



STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN

TAGUNGSBAND DER STATUSTAGUNG 2023

SCHRIFTENREIHE PROJEKTRÄGER JÜLICH

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek.

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte Bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

Für den Inhalt und das Bildmaterial der einzelnen Beiträge tragen die Autoren die Verantwortung.

Alle Vorhaben, zu denen im vorliegenden Band Beiträge veröffentlicht sind, wurden im Rahmen der Maritimen Forschungsstrategie 2025 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWK) gefördert. Der Tagungsband wurde aus Projektfördermitteln des BMWK finanziert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Herausgeber und Vertrieb

Forschungszentrum Jülich GmbH

Zentralbibliothek, Verlag

D-52425 Jülich

Telefon 02461 61 - 53 68

Telefax 02461 61 - 61 03

E-Mail zb-publikation@fz-juelich.de

Internet www.fz-juelich.de/zb

Satz und Layout

Projekträger Jülich

Bildnachweis

©unikyluckk - stock.adobe.com

Schriftenreihe Projekträger Jülich

ISBN 978-3-95806-732-5

Vollständig frei verfügbar im Internet auf dem Jülicher Open Access Server (JuSER) unter:
www.fz-juelich.de/zb/openaccess.

Dies ist eine Open-Access-Publikation, die unter den Lizenzbedingungen der Creative Commons Attribution License 4.0 veröffentlicht wurde, welche die uneingeschränkte Nutzung, Verbreitung und Vervielfältigung in jedem Medium erlaubt, sofern das Originalwerk ordnungsgemäß zitiert wird.

STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN

TAGUNGSBAND DER STATUSTAGUNG 2023

SCHRIFTENREIHE PROJEKTTRÄGER JÜLICH

VORWORT

Die maritime Wirtschaft steht wie wir insgesamt vor großen Herausforderungen, insbesondere mit Blick auf die Erderwärmung. Gerade die Meere und ihre Ökosysteme sind durch den Klimawandel akut betroffen. Fortlaufende Berichte im Vorfeld der Klimakonferenz der Vereinten Nationen in Dubai (COP 28) zur Rekordtemperaturanstiegen der Meere bei gleichzeitigen Höchstständen von Treibhausgasemissionen machen uns die dramatische Entwicklung deutlich. Wir müssen unseren Kurs ändern!

Viele der zukunftsweisenden Lösungen im Kampf gegen den Klimawandel lassen sich über eine nachhaltige Nutzung der Meere bei gleichzeitig aktiven Meeresschutz erschließen. Dies gilt für die Energieversorgung genauso wie für den Zugang zu nachhaltigen Lebensmitteln. Unser wirtschaftlicher Erfolg als Exportnation kann nur über eine nachhaltige Seeschifffahrt langfristig gesichert werden. Für die Umsetzung dieser Ziele brauchen wir leistungsstarke und emissionsarme Meerestechnik, Schiffe, Logistiknetze und Häfen. Die maritime Branche besitzt eine Schlüsselrolle für die Transformation der Wirtschaft.

Maritime Zukunftstechnologien und marktfähige Innovationen sind ein wichtiger Wettbewerbsfaktor. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unterstützt die Branche deshalb auch weiterhin mit einer gezielten Forschungsförderung, die innovative Produktentwicklungen in allen Zukunftsfeldern der maritimen Wirtschaft unterstützt: von Schiffbau und Schifffahrt, zur Offshore-Industrie, bis zur Meerestechnik und vielen mehr. Über 500 maritime Forschungsprojekte werden aktuell von uns gefördert.

Im Fokus unserer gemeinsamen Anstrengungen steht insbesondere die Dekarbonisierung von Schifffahrt und Schiffbau. Der neue Förderschwerpunkt MARITIME.zeroGHG im Maritimen Forschungsprogramm spielt dabei eine zentrale Rolle, um klimafreundliche Schiffstechnologien in die Umsetzung zu bringen. Dieser Programmschwerpunkt ist auch eine große Chance, neue Geschäftsfelder zu erschließen. Trotz der schwierigen Haushaltslage werde ich mich dafür einsetzen, dass diese ambitionierten Programmziele in den nächsten Jahren umgesetzt werden können.

Was aktuell schon möglich ist, haben Forschende auf der Nationalen Maritimen Konferenz in Bremen gezeigt – auf ihrem persönlichen Weg von der Vision zur Innovation. Schiffe, die sich aus der Ferne steuern lassen und von Rotorsegeln angetrieben werden, das sind nur zwei Beispiele für die Innovationskraft der maritimen Branche in Deutschland.

Dieser Tagungsband zeigt die ganze Bandbreite der unternehmerischen Innovationen und die Erfolge der maritimen Forschungsförderung. Ich wünsche Ihnen eine interessante Lektüre und viele neue Impulse. Zugleich freue ich mich über Ihre Teilnahme an der diesjährigen Statustagung und bin gespannt auf anregende Diskussionen und den fachlichen Austausch mit Ihnen. Bis dahin!

Dieter Janecek

Koordinator der Bundesregierung für die Maritime Wirtschaft und Tourismus

INHALTSVERZEICHNIS

CLEAN 15

CRUISE LINERS: EFFICIENT ONBOARD ANAEROBIC
DIGESTION OF ORGANIC WASTES FOR ENERGY RECOVERY

STEFAN F. FAHRNHOLZ
DR.-ING. GERD WÜRSIG
MARKUS GEHRING
HANS SCHULZE
MAIK ORTH
DAGMAR POHL
PROF. DR.-ING. STEFAN KÖSTER

FlexiFuel 25

AUTOMATISIERTE KRAFTSTOFFSYSTEME FÜR
ZUKÜNFTIGE SCHIFFSKRAFTSTOFFE

ANDREAS KRAFFT
NICO WEISS
DR. RER. NAT. JASMIN BULLERMANN
PROF. DR.-ING. FRIEDRICH WIRZ

AVALON 35

ASSISTANT SYSTEM FOR AIRBORNE VIDEO-BASED REAL-TIME ANALYSIS
AND OBJECT RECOGNITION USING NEURAL NETWORKS

CARSTEN SCHWARZ
PELIN ÖZKIRAL
DR. JAN POSPÍŠIL
RALF MÖLLERS
FRITJOF STEINERT
PROF. DR. BENNO STABERNACK
PROF. DR. ANDREAS ZELL
BENJAMIN KIEFER
MARTIN MESSMER
LEON VARGA

UWSensor

47

ENTWICKLUNG EINES AUF PROJEKTION STRUKTURIERTER LICHTMUSTER
BASIERENDEN ECHTZEITFÄHIGEN UNTERWASSER-3D-SENSORS

DR. CHRISTIAN BRÄUER-BURCHARDT

MICHAEL BLEIER

DR. CHRISTOPH MUNKELT

DIRK FROMME

STEFAN MARX

CHRISTIAN DETTMER

DR. PETER KÜHMSTEDT

PROF. DR. GUNTHER NOTNI

ROBUST

63

INTEGRIERTES BESCHICHTUNGS- UND REINIGUNGSKONZEPT ZUR
BEWUCHSKONTROLLE AN OFFSHORE-STRUKTUREN

TIM HEUSINGER VON WALDEGGE

DR. DOROTHEA STÜBING

BERND DAEHNE

LUKAS KUHN

DR. THORSTEN FELDER

DR. PHILIP KENSBOCK

ProProS

75

NUTZUNG VON ECHTZEITDATEN ALS BASIS FÜR EINE VORAUSSCHAUENDE
PLANUNG UND STEUERUNG DER PRODUKTION MARITIMER SYSTEME

DIPL.-ING. HEIKO BUCHHOLZ

DR. BERNHARD URBAN

PROF. DR.-ING. DIPL.-WIRT.-ING. GÜNTHER SCHUH

ESBEN SCHUKAT, M.SC.

NIKLAS SCHÄFER, M.SC.DR.

DR. CARSTEN ZERBST

SAMSON

91

SCHIFFBAULICHE ANWENDUNGEN VON METHODEN
ZUR STRÖMUNGSKONTROLLE

FARHAN MATIN, M. SC.

DIPL.-ING. ALEXANDER HYLLA

PROF. DR.-ING. SVEN GRUNDMANN
DIPL.-ING. TOBIAS BESTIER
MATTHIAS FROMM, M. SC.
PROF. DR.-ING. JÖRN KRÖGER
DIPL.-ING. MATTHIAS FROMM
DIPL.-ING. JOHANNES WILL
DIPL.-ING. LUTZ KLEINSORGE
DIPL.-ING. ACHIM FISCHER
PHILIPP WIEDEMER, M. SC.

DeepCsolution

107

DEEPC3000 – ENTWICKLUNG UND ERSTER EINSATZ EINES
BETONDRUCKGEHÄUSES FÜR TIEFEN BIS 3.000 M

DR.-ING. MARCUS HERING
DR.-ING. SEBASTIAN WILHELM
DR. RER. NAT. FRANK WENZHÖFER
LENNARD FROMMHOLD
HEINRICH WASEMANN
MARTIN BERGHOLZ
DIPL.-ING. ELISABETH SCHÜTZE
DR.-ING. JULIANE WAGNER
PROF. DR.-ING. ALEXANDER SCHUMANN
DR. ING. BIRGIT BECKMANN
PROF. DR.-ING. DR.-ING. E.H. MANFRED CURBACH

B ZERO

123

ENTWICKLUNG DER WACHFREIEN SCHIFFSBRÜCKE

PAUL KOCH
MANFRED CONSTAPEL
HANS-CHRISTOPH BURMEISTER

smart.START

135

SMARTE INBETRIEBNAHME

TIM JANSEN

NINA KÖSTER

PROF. HERMANN LÖDDING

HENRIKE LOOP

JAN WALLNER

ANDRE EBERLEI

THOMAS PAWLIK

Grout-WATCH

151

UNTERSUCHUNG DES TRAGVERHALTENS VON OFFSHORE-GROUT- VERBINDUNGEN UNTER WASSER AN TRAGSTRUKTUREN MIT DYNAMISCHEN WECHSELWIRKUNGEN

DR. A. NUBER

JAKOB BORGELT

DR.-ING. MAREIKE COLLMANN

DENNIS DREGER

DR. HERBERT FRIEDMANN

DR.-ING. MARTIN KOHLMEIER

TOBIAS SCHOSSIG

NIKLAS RÖMGENS

DR.-ING. STAVROULA TSIAPOKI

DR.-ING. STEFAN WERNITZ

MarKomp

169

GENERATIVE FERTIGUNG MARITIMER KOMPONENTEN

DR.-ING. LARS GREITSCH

CHRISTIAN KLÖTZER-FREESE

TOBIAS KRUSE

MOHAMAD KHALIL

PROF. DR.-ING. WILKO FLÜGGE

ALEXANDER JENTSCH

PHILIPP ANDREAZZA

KLARA PEJIC

PROF. DR.-ING. HABIL. OLAF KESSLER
DR.-ING. HANNES FRÖCK

MarTERA - FlexiMan

185

FLEXIBLE ADDITIVE MANUFACTURING FOR COMPETITIVE
MARITIME COMPONENTS

VINZENZ MÜLLER
JANEK FASSELT
CHRISTIAN KLÖTZER-FREESE
TOBIAS KRUSE
FLORIAN WAGNER

MarTERA - Autoplan

197

NUMERISCHE UND EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN EINES
SCHNELLEN EINRUMPF-BOOTS

BARBARA BLUM-THOMAS
PROF. DR.-ING. ANDRÉS CURA HOCHBAUM
KAY DOMKE
DR.-ING. STEFAN HARRIES
EMILIE SCHMIDT
DR.-ING. SEBASTIAN UHAREK
MATTHIAS VOLKMANN

MarTERA – NuLIMAS

211

ENTWICKLUNG EINES NUMERISCHEN MODELLS ZUR UNTERSUCHUNG
VON BODENVERFLÜSSIGUNG UM MARINE STRUKTUREN

CHRISTIAN WINDT
NILS GOSEBERG
HENRIK RUSCHE
RANJITH K. SHANMUGASUNDARAM
FRANK ADAM
VINAY K. VANJAKULA

MarTERA – DDD-BATMAN

DATA-DRIVEN DEGRADATION MONITORING AND PREDICTION
OF BATTERIES FOR MARITIME APPLICATIONS

225

VANESSA GRENDZE

MAXIMILIAN BRUCH

AmmoniaMot

REGENERATIV ERZEUGTES AMMONIAK ALS KRAFTSTOFF
DER ZUKUNFT FÜR MARINE-VERBRENNUNGSMOTOREN IN EINER
DEKARBONISIERTEN WELT

235

KARSTEN STENZEL

PHILLIP THORAU

VALENTIN SCHARL

DOMINIK KRAC

SEBASTIAN RÖSLER

HARALD ARNDT

AmmoniakMotor

ENTWICKLUNG VON SIMULATIONSWERKZEUGEN FÜR
ZUKÜNFTIGE MARITIME AMMONIAK-VERBRENNUNGSMOTOREN

251

DR.-ING. MARTIN THEILE

DIPL.-MATH. TECHN. ANTJE HOPPE

DR.-ING. SASCHA PREHN

PROF. DR.-ING. BERT BUCHHOLZ

DR.-ING. LARS SEIDEL

M. SC. LAURA GONZALES

PROF. DR.-ING. FABIAN MAUSS

REMAP

ENTWICKLUNG LUFTDROHNEN-GESTÜTZTER ECHTZEITDATENDIENSTE
AUS OPTISCHEN SENSOREN

267

DR. THOMAS HEEGE

DR. KNUT HARTMANN

DR. MARTIN NÄGELE

DR. ENNO PETERS

CLEAN

CRUISE LINERS: EFFICIENT ONBOARD ANAEROBIC DIGESTION OF ORGANIC WASTES FOR ENERGY RECOVERY

AUTOREN

STEFAN F. FAHRNHOLZ	CARNIVAL MARITIME GMBH, CMG
DR.-ING. GERD WÜRSIG	GMW CONSULTANCY, GMW
MARKUS GEHRING	MARTIN SYSTEMS, MS
HANS SCHULZE	MARTIN SYSTEMS, MS
MAIK ORTH	IBZ HOHEN LUCKOW, IBZ
DAGMAR POHL	LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER, LUH
PROF. DR.-ING. STEFAN KÖSTER	LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER, LUH

1. EINLEITUNG

Die Kreuzfahrtindustrie hat in den letzten Jahren vermehrt Aufmerksamkeit aufgrund ihres Beitrags zu Umweltfragen erhalten. In ihrem Bestreben, nachhaltigere Reisemöglichkeiten anzubieten, haben Initiativen zur Reduzierung von Lebensmittelabfällen bei der Zubereitung und dem Verzehr bereits beachtliche Erfolge erzielt. Dennoch besteht noch eine offene Entsorgungsfrage bezüglich der organischen Abfälle, die täglich an Bord von Kreuzfahrtschiffen produziert werden. Abbildung 1 illustriert, schematisch die Behandlung organischer Reststoffe an Bord moderner Kreuzfahrtschiffe.

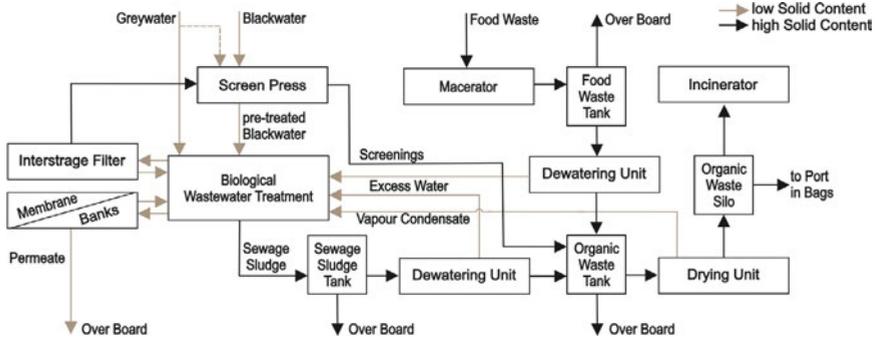


Abb. 1: Darstellung der Behandlung organischer Reststoffe an Bord moderner Kreuzfahrtschiffe (Schmüller et al. 2022)

Das BMWK finanzierte F&E-Projekt CLEAN (Cruise Liners: Efficient Onboard Anaerobic Digestion of Organic Wastes for Energy Recovery) verfolgte das Ziel, eine Biogasanlage für den Einsatz auf Kreuzfahrtschiffen zu entwickeln. Konkret setzte sich das Vorhaben

vertieft mit Fragen der Energiegewinnung durch die anaerobe Behandlung organischer Reststoffe direkt an Bord auseinander. Aufbauend auf Erfahrungen von der Landseite wurde die seit vielen Jahren erprobte und technisch ausgereifte Anaerobtechnik auf das System Schiff übertragen und entsprechend der dort bestehenden Rahmenbedingungen angepasst. Abbildung 2 stellt die Bausteine des CLEAN-Vorhabens vereinfacht dar.

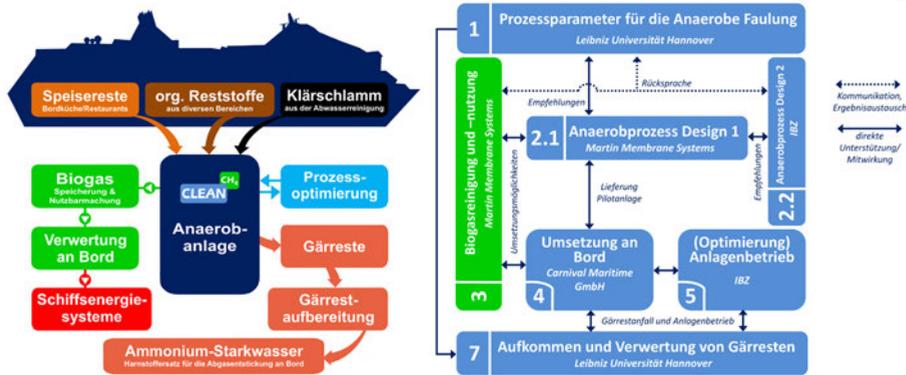


Abb. 2: Struktur und Inhalte des CLEAN Vorhabens (Quelle: ISAH)

Jedes organische Restmaterial ist potenziell als Substrat für die Biogasproduktion geeignet. So wird beispielsweise in kommunalen Kläranlagen Klärschlamm zu Biogas umgewandelt, vor allem um die interne Energieversorgung aufrecht zu erhalten. Im Rahmen der erneuerbaren Energien hat die Biogasproduktion auch in der Landwirtschaft stark zugenommen, sodass Energiepflanzen wie Mais und organische Rückstände aus der Tierhaltung als Substrate verwendet werden. In mehreren europäischen Ländern werden jedoch auch Lebensmittelabfälle als Substrat verwendet, insbesondere in kommunalen Kläranlagen, wenn freie Kapazitäten eine Co-Vergärung erlauben.

Es ist zu erwarten, dass vorrangig der Aspekt der Energieerzeugung den Reedern einen maßgeblichen Anreiz bieten wird, geeignete Biogastechnologie ohne weiteren gesetzlichen Druck an Bord zu integrieren. Türöffner für die schiffseitige Nutzung von Biogas ist die seit 2009 bestehende Legitimation Erdgas, genauer LNG (Liquefied Natural Gas), als Kraftstoff an Bord zu nutzen (IMO 2015).

2. POTENTIALANALYSE ZUR BEHANDLUNG ORGANISCHER ABFÄLLE AN BORD VON KREUZFARTSCHIFFEN

Organische Reststoffe wie Speisereste und Klärschlamm fallen an Bord von Kreuzfahrtschiffen in einem nicht unerheblichen Maß an. Daher ist insbesondere eine umweltgerechte Entsorgung dieser Stoffströme von wesentlicher Bedeutung. Ziel des Verbundvorhabens CLEAN war es, Wege aufzuzeigen, wie diese Stoffströme direkt an Bord verwertet werden können und mit Biogas ein an Bord nutzbarer Energieträger produziert

werden kann. Diesbezüglich wurden vielsprechende und innovative Lösungsansätze zur Etablierung der Anaerobtechnik an Bord von Kreuzfahrtschiffen erprobt und weiterentwickelt.

Im CLEAN-Teilvorhaben „Grundlagenermittlung und Prozessdesign für die anaerobe Faulung organischer Reststoffe an Bord von Kreuzfahrtschiffen – CLEAN PROCESS“ war es Aufgabe der Leibniz Universität Hannover, umfängliche Informationen über die vorherrschenden Rahmenbedingungen (relevante Substrate, Verfahrensarten, Gasertrag, Gärreste) an Bord von Kreuzfahrtschiffen zu ermitteln und den Grundstein für nachgeschaltete Arbeiten der Projektpartner zu legen. Ein umfassendes Substrat-Screening der an Bord anfallenden organischen Stoffströme wurde erbracht, da im Vorfeld des Vorhabens keine oder nur sehr begrenzte Informationen über die an Bord anfallenden Mengen und Zusammensetzungen der Stoffströme Speisereste, Klärschlamm und Screen-Press-Rückstände existierten. In dem umfangreichen Screening konnten wesentliche Kennwerte erhoben werden. Schumüller et al. (2022) schätzt die Entstehung ca. 9 kg organischer Reststoffe pro Person und Tag, was einem Methanertrag von 159 Liter pro Person und Tag entspricht. Zusätzlich zeigte sich ein guter Gasertrag bei Co-Vergärung der vorhandenen Stoffströme und führte zu einer Ertragssteigerung von 24%. Insgesamt können potentiell über die anaerobe Vergärung der an Bord anfallenden organischen Reststoffe rund 4% des Schiffsenergiebedarfs gedeckt werden. Die Kennwerte der Potentialanalyse führte zu den in Abbildung 3 aufgeführten Abschätzungen, die für das Referenzschiff AIDAperla durchgeführt wurden.

CLEAN PROCESS – Anaerobic Digestion – Mass Balance Reference: AIDA Perla - 4,700 persons aboard



Abb. 3: Berechnung der Potentiale/Stoffströme (kg/d) für das Referenzschiff AIDAperla (Quelle: ISAH)

Alle Ergebnisse der Potentialanalyse sind in der Open Access Veröffentlichung „Biogas potential of organic waste onboard cruise ships – a yet untapped energy source“ ausführlich beschrieben worden (Schumüller et al. 2022). Somit konnten erfolgreich die Grundlagen für die Konzipierung, den Aufbau und Betrieb einer halbertechnischen Biogasanlage für den maritimen Einsatz gelegt werden (siehe Abschnitt 3).

3. ANAEROBISCHE FERMENTIERUNGSPROZESS

Wesentliche Anforderungen an das Anlagendesign für Biogasanlagen an Bord von Kreuzfahrtschiffen ist ein möglichst geringer Anlagen-Fußabdruck bei bestmöglicher Prozessstabilität. Bevor eine entsprechende Pilotbiogasanlage an Bord eines Kreuzfahrtschiffes erprobt werden kann, galt es im Vorfeld mit einer Anlage im halbtechnischen Maßstab erste Betriebserfahrungen zu sammeln. Die im Technikum der LUH betriebene Anlage ist in Abbildung 4 dargestellt.

Die Betriebserfahrungen mit der über 14 Monate im Kreuzfahrtschiffkontext betriebenen halbtechnischen Versuchsanlage ergab folgendes: Ein stabiler und produktiver Betrieb eines hoch belasteten Anaerobreaktors, unter Einsatz von Speiseresten und Klärschlamm als Substrat, ist umsetzbar. Die Untersuchungen ergaben folgende Empfehlungen für den Betrieb einer mesophilen Anaerobanlage an Bord: Spezifisches Reaktorvolumen von 80 L/P bei einer organischen Raumbelastung von 4-5 kg oTR/m³•d sowie einem Schlammalter von 14-19 Tagen. Eine resultierende Produktivität wird mit 3,7 m³ Biogas/m³ Reaktor •d bzw. 2,3 m³ Methan/m³ Reaktor •d abgeschätzt. Der zugehörige Organik-Abbaugrad liegt zwischen 61% und 84%.

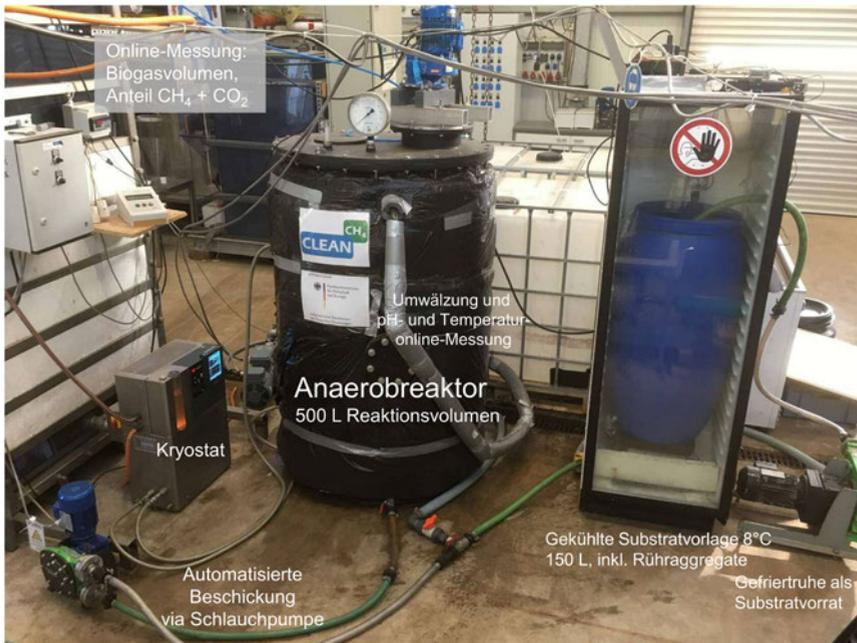


Abb. 4: Halbtechnische CLEAN Versuchsanlage in der Versuchshalle Herrenhausen, Hannover (Quelle: ISAH)

Die in Ergänzung aufgesetzte modelltechnische Abbildung einer schiffseitigen Biogasanlage wurde mithilfe der Simulationssoftware SIMBA# umgesetzt (siehe Abbildung 5). Dies ermöglichte, zusätzlich prozesstechnische und betriebliche Modifikationen theoretisch zu erproben und Auswirkungen von Anlagendesign oder Betriebseinstellung vertieft

zu testen und zu bewerten. In der Simulation zeigte sich, dass sowohl einstufige als auch zweistufige Schiffsbiogasanlagen umsetzbar sind. Einstufige Reaktoren weisen hierbei eine höhere Prozessstabilität auf und können ein variierendes Substratangebot besser kompensieren. Zweistufige Reaktor zeigen hingegen einen um 12 % erhöhten Biogas-ertrag sowie einen 8 % höheren Abbaugrad. Die Berücksichtigung einer thermophilen Vorstufe zeigte keine relevanten Vorteile. Abschließend erlaubten die Simulationsergebnisse einen Rückschluss auf ein spezifisches Reaktorvolumen von 85-94L/Person zu geben und bestätigten damit die Ergebnisse aus der Potentialanalyse (siehe oben).

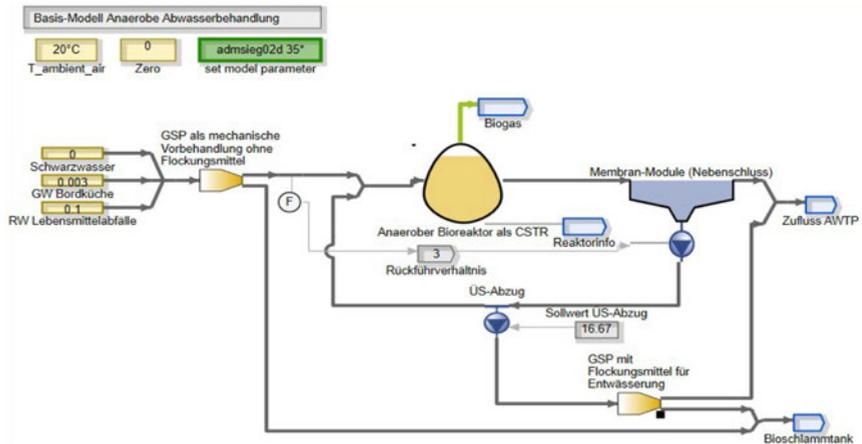


Abb. 5: Modelltechnische Darstellung einer anaeroben Abwasserbehandlung an Bord eines Kreuzfahrtschiffes in SIMBA# (Ostrowski 2021)

Kreuzfahrtschiffe sind mit komplexen umwelttechnischen Systemen ausgestattet. Die dort installierten Systeme sind auf die schiffsseitigen Rahmenbedingungen angepasst und können somit nicht unmittelbar mit Anlagen an Land verglichen werden. Mit den in den Abschnitten 2 und 3 beschriebenen Arbeiten konnten erfolgreich die Grundlagen geschaffen werden, konkrete und belastbare Vorgaben für die (Pilot-)Anlagenauslegung für den Betrieb an Bord geben zu können, die zur Auslegung und Bau der in Abschnitt 4 beschriebenen Anlage dienen.

4. ANAEROBISCHE FERMENTIERUNGSANLAGE

Im Rahmen des Verbundprojekts CLEAN wurde eine an Bord einsetzbare Biogas-Versuchsanlage für maritime Anwendung entworfen, die nun an Bord eines AIDA Schiffes installiert und betrieben werden wird. Der sogenannte High-Performance Digester ist in Abbildung 6 dargestellt. Er besteht aus einem Mischtank, zwei in Serie geschalteten Tanks, die einen gestuften Reaktor konstituieren, der im mesophilen Bereich betrieben wird.

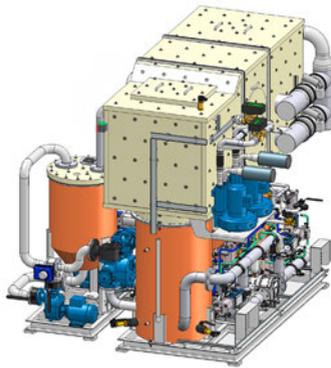


Abb. 6: Anaerobe Fermentierungsanlage (Quelle: MS)

Als Substrat ist –wie in Abschnitt 2 dargelegt– eine Mischung aus an Bord anfallenden organischen Rückständen vorgesehen. Dazu zählen zerkleinerte Lebensmittelabfall und Klärschlamm sowie auch Fette. Die Anlagekapazität beträgt 50l/d.

Die Anlage wird als „Continuously Stirred Tank Reactor“ betrieben, in dem Schlammalter und hydraulische Aufenthaltszeit gleich sind. Das Substrat verbleibt in den Reaktoren im Durchschnitt 20 Tage. Nach dem Mischen und einer Vorfermentation im vorgeschalteten Mischtank wird das Substrat auf der Unterseite des ersten Reaktortanks zugegeben. Der Tank wird 1 bis 3 mal pro Tag in kleinen Chargen mit Substrat versorgt. Das Substrat wird anschließend aus dem ersten Reaktor auf die Unterseite des zweiten Reaktortanks gepumpt. Das erzeugte Biogas wird an der Oberseite der Reaktoren aufgefangen. Das Biogas passiert einen Durchflussmesser und Gasanalysator. Es wird die Methankonzentration im Biogas bestimmt, die wiederum Rückschlüsse auf die Zusammensetzung des Biogases zulässt. Die erwartete Zusammensetzung des Biogases ist in Tabelle 1 aufgeführt. Das Biogas durchströmt ein Wasserschloss, wo polaren Elementen entfernt werden. Das gereinigte Biogas weist anschließend eine gut nutzbare Mischung von Methan und Kohlendioxid auf, die in Gaskesseln auf dem Schiff direkt verwertet werden können.

Tab. 1: Erwartete Biogaszusammensetzung

Biogas Komponente	Formula	Volumen Fraktion [% v/v]	Ertrag der Pilotanlage [Nm ³ /d]
Methan	CH ₄	40 - 80	3,2
Kohlendioxid	CO ₂	20 - 60	2,1
Stickstoff	N ₂	0 - 5	Max. 0,2
Wasser	H ₂ O	Ca. 3	
Wasserstoff	H ₂	< 1	Max. 0,04
Schwefelwasserstoff	H ₂ S	< 1	Max. 0,04
Ammoniak	NH ₃	< 0, 3	Max. 0,013
Flüchtige Fettsäuren	C _x H _y O _z	Spuren	

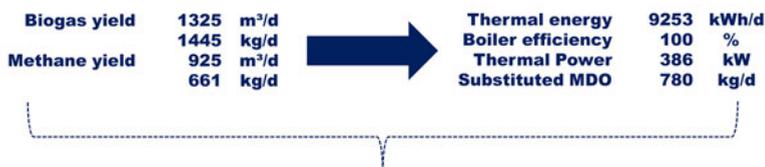
5. ÖKONOMISCHE BETRACHTUNG

Die Implementierung der Anaerobtechnik zur Biogaserzeugung an Bord von Kreuzfahrtschiffen steht noch sehr am Anfang. Eine umfassende ökonomische Bewertung ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht möglich. Neben energetischen Vorteilen und attraktiven Verwertungsmöglichkeiten an Bord ergeben sich aber auch weitreichende Fragen bzgl. der Integration des Prozesses in das System Schiff. Zusätzliche Umweltechnik weist Platzbedarf auf, der für anderweitige Nutzungen wie Passagierkabinen dann nicht mehr genutzt werden kann. Aber die Technik reduziert auch den Energiebedarf z. B. für die Trocknung der Gärreste und stellt eine erneuerbare Energiequelle für das Schiff bereit. Der größte Teil der Kosteneinsparung ergäbe sich demnach aus dem reduzierten Bedarf an Bunkerbrennstoff. Um erste Anhaltspunkte zu erhalten, enthält Abbildung 7 eine Schätzung der möglichen Einsparungen auf Jahresbasis für das Referenzschiff AIDAperla.

Und es bestehen weitere Potenziale für wirtschaftliche Vorteile. Der Haupttreiber für alternative Kraftstoffe in der EU ist „Fuel EU Maritime“, ein Teil des Fit für 55-Pakets. Diese Vorgaben zeigen einen klaren Weg zur Reduzierung der Kohlenstoffintensität des Schiffs-kraftstoffs an der Schnittstelle zum Bunker auf. Die Möglichkeit, an Bord gewonnenes Biogas in diesem Rahmen zu berücksichtigen, würde die Attraktivität dieser Technologie weiter erhöhen.

CLEAN – Methane Production and Energy Use

Reference: AIDA Perla – 4,700 persons aboard



≈ 150.000 \$ per year fuel savings

Abb. 7: Abschätzung der Methanproduktion und Möglichkeiten der energetischen Verwertung auf dem Referenzschiff AIDAperla (Quelle: ISAH)

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das CLEAN-Konzept zum Umgang mit organischen Reststoffen an Bord von Kreuzfahrtschiffen beschreibt erstmalig die Möglichkeit der Implementierung einer Biogasanlage an Bord. Hierbei ist die Anaerobstufe nahtlos in das bestehende Schiffssystem integrierbar (Abbildung 8).

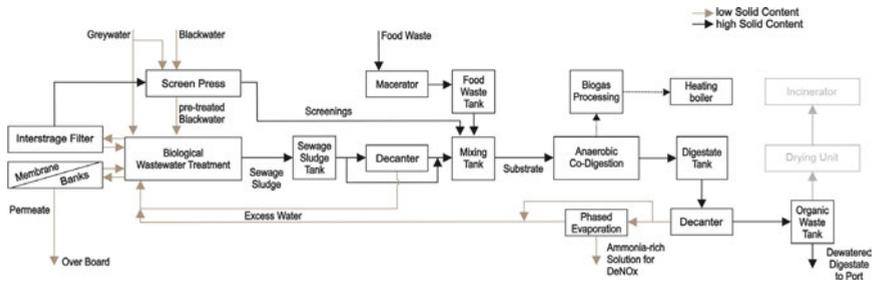


Abb. 8: Vereinfachte Darstellung des angepassten Behandlungssystems für organische Reststoffe an Bord von Kreuzfahrtschiffen nach dem CLEAN-Konzept (Quelle: ISAH)

Die Ergebnisse von CLEAN sind so aussagekräftig, dass u.a. ein Tool zur Bemessung für Biogasanlagen entwickelt werden konnte, dass nach Ende des Vorhabens eine Übertragbarkeit auf andere Schiffe sowie eine Erweiterung des Nutzerkreises ermöglicht.

Ferner ergeben sich weitere Verwertungsoptionen im Sinne einer bordeigenen Kreislaufwirtschaft, so zum Beispiel durch die in CLEAN ebenfalls untersuchte Herstellung eines Additivs zur Entstickung von Schiffsabgasen: So konnte auf Basis der Gärreste aus der Biogasanlage mittels sequentieller Eindampfung ein Ammonium-Starkwasser hergestellt werden. Insgesamt wurde eine Lösung mit 4% Ammoniumgehalt hergestellt, die direkt im Entstickungsprozess von Schiffsabgasen eingesetzt werden kann. Bisher für die Entstickung genutzter Harnstoff könnte hierdurch anteilig ersetzt werden.

Das Vorhaben konnte erfolgreich die Anpassung der an Land umfassend eingesetzten Biogaserzeugung im Rahmen eines konsekutiven Upscaling umsetzen. Der noch ausstehende Erprobungsbetrieb an Bord ist u.a. im Rahmen eines HAZID-Prozesses und Flaggenzulassung auch im Hinblick auf Sicherheitsbelange sachkundig vorbereitet worden.

Der CLEAN-Verband blickt damit auf ein erfolgreiches Projekt zurück und hat zur weiteren Ausgestaltung einer umweltfreundlichen Schifffahrt beigetragen.

DANKSAGUNG

Das Projektconsortium dankt dem BMWK für die Förderung und dem PTJ für die Administration und Unterstützung.

LITERATUR

- [1] IMO (2015): International Code of Safety for Ships using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels. IGF-CODE. Online verfügbar unter <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/28-CCC1IGF.aspx>.
- [2] Ostrowski, Nico (2021): Potentialanalyse – Anaerobe Abwasserbehandlung an Bord von Kreuzfahrtschiffen. Master thesis. Leibniz University Hannover, Hannover. Institute of Sanitary Engineering and Waste Management.
- [3] Schumüller, K.; Weichgrebe, D.; Köster, S. (2022): Biogas potential of organic waste onboard cruise ships – a yet untapped energy source. In: Biomass Conversion and Biorefinery 12 (12), S. 5647–5662. DOI: 10.1007/s13399-020-01249-0.

FLEXIFUEL

AUTOMATISIERTE KRAFTSTOFFSYSTEME FÜR ZUKÜNFTIGE SCHIFFSKRAFTSTOFFE

AUTOREN

ANDREAS KRAFFT	TU HAMBURG
NICO WEISS	TU HAMBURG
DR. RER. NAT. JASMIN BULLERMANN	TU HAMBURG
PROF. DR.-ING. FRIEDRICH WIRZ	TU HAMBURG

1. EINLEITUNG

Die maritime Industrie hat sich in den letzten Jahren stark verändert, insbesondere im Hinblick auf Umweltschutz und Nachhaltigkeit. Seit Januar 2020 gelten weltweit strengere Grenzwerte für den Schwefelgehalt in Schiffskraftstoffen, wobei ein maximaler Schwefelgehalt von 0,5% und in Schwefelemissions-Überwachungsgebieten ein Wert von maximal 0,1% ohne Abgasnachbehandlung nicht überschritten werden darf [1]. Diese Maßnahmen zielen darauf ab, die Emissionen von Schwefeloxiden und anderen Schadstoffen, die zu Luftverschmutzung und Gesundheitsproblemen führen, deutlich zu reduzieren.

Die Auswirkungen der COVID-19-Pandemie führten zu einem vorübergehenden Rückgang des Reiseverkehrs, was wiederum zu einem Überangebot an höherwertigen Kraftstoffen auf dem Markt führte. Diese Kraftstoffe wurden vermehrt zur Verdünnung von Schweröl verwendet, um die neuen Schwefelgrenzwerte einhalten zu können. Darüber hinaus wurde die Initiative „FuelEU Maritime“ als Teil des Pakets „Fit für 55“ verabschiedet, und somit wird die schrittweise Einführung von CO₂-neutralen Kraftstoffen in der Schifffahrt verpflichtend [2]. Bis 2025 soll der Einsatz solcher Kraftstoffe auf 2%, bis 2030 auf 55% und bis 2050 auf 80% steigen. Auch die Internationale Maritime Organisation (IMO) hat sich das Ziel gesetzt, bis 2050 CO₂-neutral zu werden [3], was zu einer verstärkten Nachfrage nach umweltfreundlichen Antriebslösungen führen wird.

Dieses Ziel können dadurch erreicht werden, dass zu Schweröl oder Marinediesel soweit synthetische oder biologische Kraftstoffe beigemischt werden, bis die geforderten Grenzwerte eingehalten werden. Alleine schon die Umstellung von konventionellem Schweröl auf Marinediesel erfordert eine genaue Steuerung und Überwachung, um einen reibungslosen Übergang zu gewährleisten. Dieser Umschaltprozess wird zurzeit häufig noch manuell durchgeführt und unterliegt nur der Vorgabe von, beispielsweise, einer maximalen Temperaturänderung vor dem Dieselmotor von 2 Kelvin pro Minute. Mit den neuen CO₂-neutralen Kraftstoffen, die zum Teil kontinuierlich beigemischt werden sollen, werden neue Probleme bei der Kraftstoffhandhabung auftreten. Vor diesem Hintergrund gewinnt die Automatisierung des Kraftstoffsystems, in Bezug auf Umschalt- und Mischungs-

vorgänge, zunehmend an Bedeutung. Automatisierte Systeme ermöglichen nicht nur einen effizienteren und präziseren Übergang, sondern bieten auch die Möglichkeit, den gesamten Prozess zu überwachen und potenzielle Probleme frühzeitig zu erkennen und Lösungen in die Wege zu leiten. Ziel des Forschungsvorhaben FlexiFuel war die Entwicklung von erforderlichen Verfahren zur messtechnischen Überwachung und Steuerung solcher Prozesse.

2. SENSOR ZUR BESTIMMUNG DER PERMITTIVITÄT

Im Rahmen des Projektes wurde an der Technischen Universität Hamburg von der Arbeitsgruppe Schiffsmaschinenbau und dem Institut für Hochfrequenztechnik ein Sensor zur Messung der Permittivität eines durchfließenden Mediums entwickelt. Aus diesem Sensor ist eine gemeinsame Patentanmeldung entstanden.

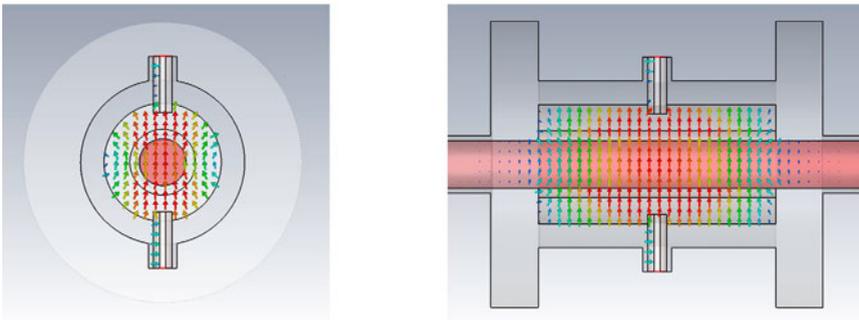


Abb. 1: Elektrische Feldlinien im Resonator

Der Sensor (Abb. 1) besteht aus einem zylindrischen Hohlraumresonator mit dem 2,5-fachen Rohrdurchmesser. Um eine Störung des Strömungsprofils in der Kraftstoffleitung zu vermeiden, wird der Innenraum mit einem dielektrisch verlustarmen Medium verfüllt und eine Bohrung in der Größe der Kraftstoffleitung im Zentrum des Zylinders vorgesehen. Die Anbindung an eine Rohrleitung findet an den Seiten über zwei Flanschpaare statt. Die Dimensionen des Hohlraumresonators sind hierbei so gewählt, dass es durch die für die Kraftstoffleitung nötigen Öffnungen in den Wänden des Resonators nur zu einer geringen Störung der elektrischen Felder im Inneren des Resonators kommt.

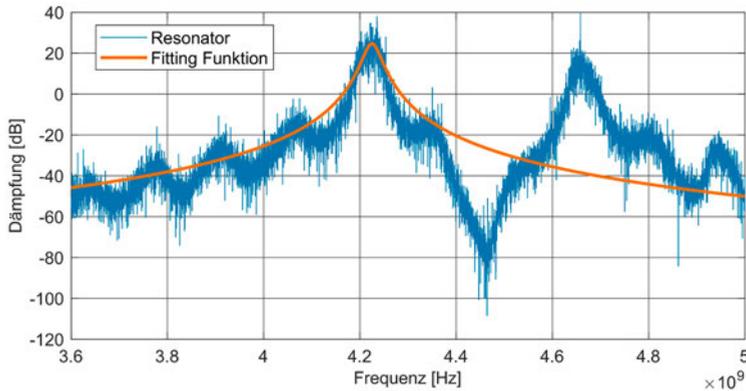


Abb. 2: Exemplarische Einzelmessung

Die Resonanzfrequenz f_r der Grundmode des Resonators (Abb. 1) kann mit der Formel

$$f_r = \frac{c_0}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{2X'_{11}}{D}\right)^2 + \left(\frac{1}{l}\right)^2} \quad (1)$$

berechnet werden. Hierbei ist c_0 die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, ϵ_r die relative Permittivität des Mediums in der Messkammer, X'_{11} die erste Nullstelle der Ableitung der Besselfunktion 1. Ordnung, D der Durchmesser des Zylinders und l die Länge des Zylinders. Da die Dimensionen des Resonators bekannt sind, kann die Formel zu

$$f_r = \frac{f_{r,0}}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

vereinfacht werden. $f_{r,0}$ ist hierbei die Resonanzfrequenz des mit Luft gefüllten Resonators. Da die Dimensionen des Resonators mit der Temperatur schwanken und der Innenraum des Resonators nicht vollständig mit Kraftstoff verfüllt ist, kann die Formel 2 jedoch nicht direkt zur Bestimmung der Permittivität verwendet werden. Im Folgenden werden deshalb erste Erkenntnisse anhand des Messwerts der Resonanzfrequenz f_r präsentiert, welche indirekt proportional zur Kraftstoffpermittivität ist.

Die Messung der Resonanzfrequenz erfolgt durch eine Messung des frequenzabhängigen Transmissionsfaktors des Resonators (Abb. 2 blaue Kurve) im Frequenzbereich von 4,0 GHz bis 4,5 GHz. Zur Reduktion von Messfehlern erfolgt die Bestimmung mit Hilfe einer geeigneten Fitting Funktion (Abb. 2 orangene Kurve).

Aktuell wird das durchströmende Medium mit einer Rate von 1/s abgetastet. Mit einer auf den geforderten Frequenzbereich angepassten Messtechnik wird es möglich sein, die Abtastrate signifikant zu erhöhen.

3. AUFBAU DES MESSSYSTEMS

Weiterhin wurde ein Modellkraftstoffsystem (MKS) aufgebaut. Dieses ist an ein Schweröl-system, wie es an Bord eines Schiffes vor einem Dieselmotor vorkommen kann, angelehnt. Der Kraftstoff wird aus zwei beheizbaren 200l-Standardfässern gefördert. In Abbildung 3 ist dieses in einem vereinfachten Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema dargestellt. Mittels der beiden frequenzgeregelten Pumpen P-101 und P-201 und den Durchflussmessungen FI-101 und FI-201 kann ein 3-Wege-Ventil zum Umschalten zwischen zwei Kraftstoffen simuliert werden. Von der Mischstelle gelangt der Kraftstoff in das Mischrohr T-501, dem eine weitere frequenzgeregelte Pumpe P-501 nachgeschaltet ist, und kann dann mittels des elektrischen Vorwärmers H-501 erwärmt werden. Die Regelung des Vorwärmers erfolgt entweder temperatur- oder viskositätsgesteuert über das Viskosimeter V-501. Über das Druckregelventil 1-PC-501 kann ein Dieselmotor als Verbraucher simuliert werden. Der überschüssige Volumenstrom wird wieder in das Mischrohr zurückgeführt. Das gesamte MKS ist mit einer elektrischen Begleitheizung ausgestattet. Druck und Temperatur werden an geeigneten Stellen im System überwacht.

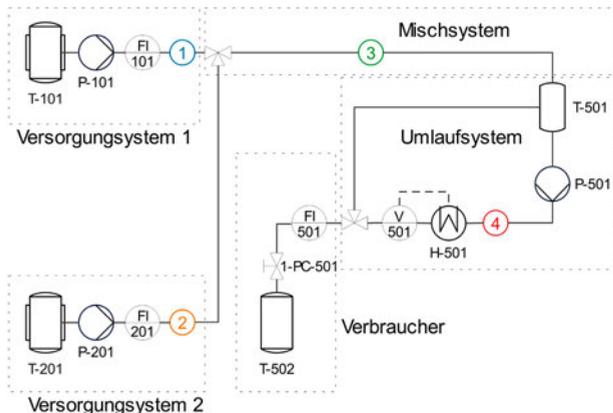


Abb. 3: Vereinfachte Darstellung des Modellkraftstoffsystems

In dem System sind vier Resonatoren eingebaut, welche in Abbildung 3 farblich und mit Nummern gekennzeichnet sind. Wie ersichtlich ist, befindet sich jeweils ein Resonator in den Kraftstoffzuleitungen, ein weiterer direkt hinter dem Mischpunkt und der vierte Resonator im Umlaufsystem.

4. AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE

Im Folgenden wird zunächst ein Umschaltvorgang von Schweröl (Heavy Fuel Oil (HFO)) auf hydriertes Pflanzenöl (Hydrogenated Vegetable Oil (HVO), Handelsname u.a. Care-Diesel) und im weiteren Verlauf ein Umschaltvorgang von Marinediesel (Marine Diesel Oil (MDO)) auf HVO betrachtet. In Tabelle 1 sind für die Versuche relevante Werte der Kraftstoffe aufgeführt. Bei der nachfolgenden Interpretation der Ergebnisse wird nur die qualitative Änderung der Resonanzfrequenz berücksichtigt.

Tab. 1: Ausgewählte Werte der verwendeten Kraftstoffe nach ISO 8217

	Viskosität [mm/s ²]	Dichte [kg/m ³]	Flammpunkt [°C]
HFO	371,5 (bei 50°C)	962,4	>120
HVO	2,9 (bei 40°C)	766	76
MDO	4,6 (bei 40°C)	889	98

4.1 Umschaltvorgang von HFO auf HVO

Zunächst wird der Umschaltvorgang von HFO auf HVO betrachtet. In Abbildung 4 sind die gemessenen Resonanzfrequenzen der einzelnen Resonatoren über der Zeit aufgetragen und in Abbildung 5 der jeweilige Anteil eines Kraftstoffes in Prozent am gesamten Durchfluss von maximal 60 l/h. Zu Beginn wird reines HFO mit einer Temperatur von 75°C in das System gefördert. Während dieser Zeit findet keine Förderung von HVO statt. Die Resonatoren 1 und 3 erwärmen sich, was zu einem leichten Anstieg der gemessenen Frequenz führt und einen Hinweis darauf liefert, dass die Resonanzfrequenz neben dem Durchfluss eine Abhängigkeit von der Temperatur aufweist. Damit der Kraftstoff die eingestellte Viskosität von 15 mm/s² erreicht, wird dieser im Umlaufsystem auf 110 °C erhitzt. Resonator 4 reagiert direkt auf jeden Aufheizvorgang. Nach einer halben Stunde beginnt die Förderung von HVO in das System. Zunächst muss durch die Pumpe der Systemdruck aufgebaut werden. Nach etwa 3 Minuten wird HVO gefördert, Resonator 3 zeigt dies durch einen sprunghaften Anstieg der gemessenen Resonanzfrequenz. Weitere 3 Minuten später kann man den ersten Einfluss von HVO im Umlaufsystem durch Resonator 4 erkennen. Durch das niedrigviskosere HVO fällt die Viskosität, und der Vorwärmer wird kürzer und weniger häufig angestellt. Im weiteren Verlauf wird der Anteil von HVO schrittweise erhöht.

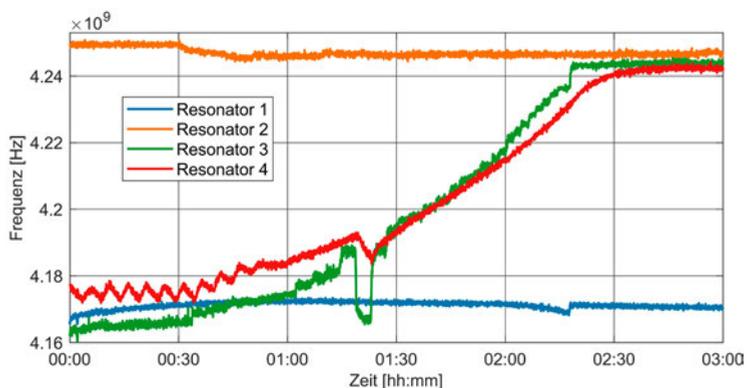


Abb. 4: Gemessene Resonanzfrequenzen beim Umschaltvorgang HFO auf HVO

Nach einer Stunde und achtzehn Minuten wurde ein Totalausfall der Kraftstoffpumpe 2 simuliert. Dies führt zu einem direkten Frequenzabfall bei Resonator 3 und zu einem

leicht verzögertem Abfall bei Resonator 4. Nachdem die Pumpe nach 5 Minuten wieder angestellt wurde, reagiert Resonator 3 direkt und die gemessene Frequenz entspricht wieder der vor dem Pumpenausfall.

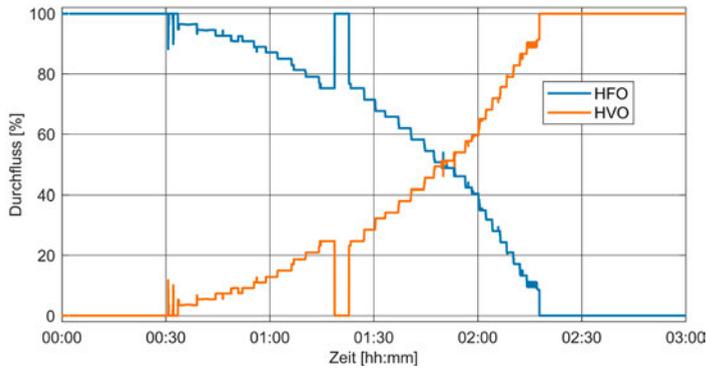


Abb. 5: Durchflussrate beim Umschaltvorgang von HFO auf HVO

Jede weitere Erhöhung des HVO-Anteils ist bei Resonator 3 gut sichtbar. Nach etwa 2:18h wird nur noch reines HVO gefördert. Nach einer weiteren halben Stunde befindet sich kein HFO mehr im Umlaufsystem, wie der konstante Messwert von Resonator 4 zeigt.

4.2 Umschaltvorgang von MDO auf HVO

Bei diesem Versuch wurden verschiedene Mischungspunkte zwischen MDO und HVO angefahren:

- › B10: 90% MDO und 10% HVO
- › B17: 83% MDO und 17% HVO
- › B25: 75% MDO und 25% HVO
- › B41: 59% MDO und 41% HVO
- › B50: 50% MDO und 50% HVO

In Abbildung 7 können diese Mischungspunkte anhand der Durchflussrate nachvollzogen werden.

Zu Beginn des Versuches befanden sich noch Restmengen HVO aus einem vorangegangenen Versuch im Umlaufsystem. Dies ist in Abbildung 6, in der erneut die Frequenzen der einzelnen Resonatoren über der Zeit aufgetragen sind, an Resonator 4 zu erkennen. Die Frequenz fällt mit zunehmender Förderung von MDO und nähert sich der Frequenz, die dieser Resonator für reines MDO annehmen würde. Nach 22 Minuten wurde auf das

Mischungsverhältnis B10 umgeschaltet. Der Druckanstieg und die beginnende Förderung von HVO lässt sich direkt an dem Abfall der gemessenen Frequenzen von Resonator 2 sehen und liefert einen Hinweis darauf, dass die Resonanzfrequenz zusätzlich zu Durchfluss und Temperatur auch auf Druckänderungen reagiert. Auch reagiert Resonator 3 unmittelbar mit einem sprunghaften Anstieg der Frequenz. Jede weitere Änderung des Mischungsverhältnisses wird durch Resonator 3 unmittelbar und durch Resonator 4 leicht verzögert erkannt.

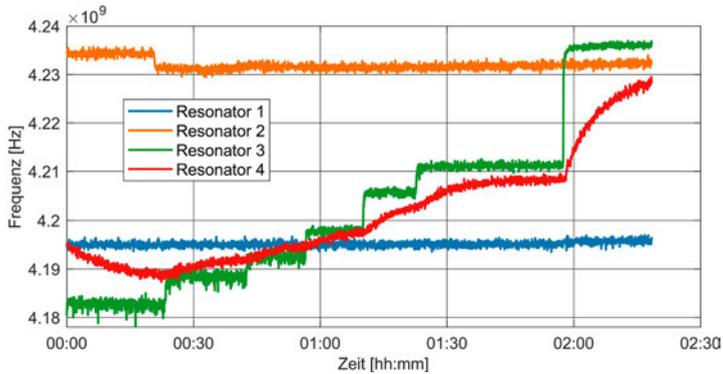


Abb. 6: Gemessene Resonanzfrequenzen beim Umschaltvorgang MDO auf HVO

Größere Unterschiede im Mischungsverhältnis, wie zum Beispiel nach 01:10h von B25 auf B42, werden durch große Sprünge in der gemessenen Resonanzfrequenz sichtbar. Nach 01:22h wurde ein Mischungsverhältnis von 50:50 eingestellt. Im Umlaufsystem ist dieses Mischungsverhältnis nach etwa einer weiteren halben Stunde stabilisiert.

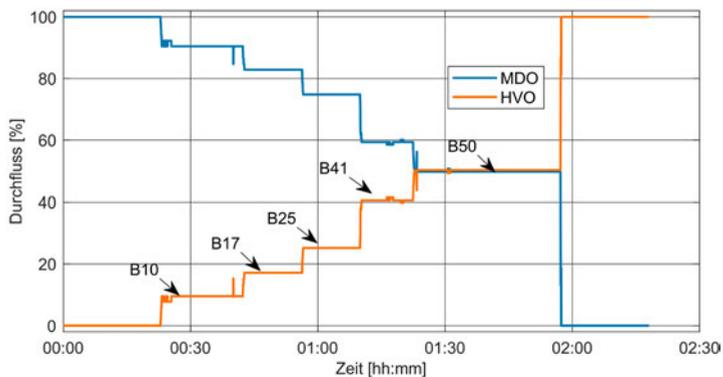


Abb. 7: Durchflussrate beim Umschaltvorgang von MDO auf HVO

Mit Beginn der reinen HVO Förderung nach 1:57h folgt Resonator 4 einer idealen Mischungskurve. Bei Resonator 3 wird, wie erwartet, ein starker Anstieg der Frequenz gemessen. Da kein MDO mehr gefördert wird, kommt es zu einem Druckabfall in diesem Kraftstoffstrang, sichtbar durch einen leichten Frequenzanstieg in Resonator 1.

5. MÖGLICHER PRAKTISCHER EINSATZ

Die Abweichungen der gemessenen Resonanzfrequenzen zwischen den Resonatoren 3 und 4 und denen in den Reinstoffleitungen lassen sich durch geometrische Unterschiede sowie Temperatur- und Druckeinflüsse erklären. In einem nächsten Schritt sollen diese Einflüsse systematisch ermittelt werden. Wenn dies geschehen ist, wird es möglich sein, das genaue Mischungsverhältnis von zwei Kraftstoffen im Durchfluss zu jedem beliebigen Zeitpunkt zu bestimmen.

Um bestmögliche Ergebnisse zu erzielen, ist es sinnvoll, jeweils einen Resonator in die Kraftstoffleitung vor dem Mischpunkt einzubauen. Die Resonatoren dienen zur Kalibrierung nachfolgender Resonatoren, z. B. nach dem Mischpunkt oder im Umlaufsystem. Alternativ kann die Dielektrizitätskonstante des Kraftstoffs im Labor bestimmt werden.

Die eigentliche Funktion der Überwachung eines Umschaltvorganges wird durch einen Resonator im Umlaufsystem realisiert. Der Verlauf der gemessenen Resonanzfrequenz durch diesen Resonator folgt bei konstanter Fördermenge immer einer idealen Mischungskurve. Abweichungen davon können somit erkannt werden. Mit diesem Resonator ist es auch möglich, die Einhaltung der eingangs erwähnten CO₂-Grenzwerte der Strategie „Fit für 55“ nachzuweisen.

Der weitere Resonator direkt hinter dem Mischpunkt ermöglicht die Erkennung von Schwaden und Blasen, die auf eine Inhomogenität infolge des dynamischen oder statischen Mischvorganges hinweisen.

Darüber hinaus können mit jedem Resonator, ungeachtet des Ortes im System, zusätzlich zu unerwarteten Druck- und Temperaturänderungen im jeweiligen Leitungsstrang auch weitere unerwünschte Verunreinigungen wie Metallspäne, Wassertropfen und Gasblasen direkt erkannt werden.

Kombiniert man die Resonatoren mit einer Steuerung und integriert diese in das Kraftstoffsystem, können neben der Problemerkennung auch Vorgaben gemacht werden, zu welchem Zeitpunkt ein bestimmtes Mischungsverhältnis vorliegen muss.

Weitere Einsatzmöglichkeiten wären die Erkennung von Wassereintrag in Hydrauliksystemen oder umgekehrt von Öl in wasserführenden Systemen.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Anhand der beiden in diesem Beitrag besprochenen Versuchen wurde aufgezeigt, dass die entwickelte Messmethode einen großen Beitrag zur Automatisierung der Kraftstoffsysteme auf Schiffen leisten kann. Sobald die Einflüsse der Temperatur und von Druckänderungen verlässlich kompensiert werden können, kann mit der Qualifizierung von Abweichungen begonnen werden. In einem nächsten Schritt sollen dann Lösungsstrategien in ein automatisches Umschaltmodul implementiert werden.

DANKSAGUNG

Wir bedanken uns für die Unterstützung vom Projektträger Jülich bei der Projektbearbeitung und -koordinierung. Weiterhin bedanken wir uns beim Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die Förderung, und ganz besonders geht unser Dank an unsere Projektpartner MAN Energy Solutions SE und ERC Emissions-Reduzierungs-Concepte GmbH.

LITERATUR

- [1] IMO. MARPOL Annex VI and NTC 2008: with guidelines for implementation. London: IMO, 2013. ISBN: 978-9-280-11560-4.
- [2] Rat der Europäischen Union: Pressemitteilung vom 25. Juli 2023. <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/07/25/fueleu-maritime-initiative-council-adopts-new-law-to-decarbonise-the-maritime-sector/>
Letzter Zugriff: September, 2023.
- [3] IMO. Resolution MEPC.377(80). 2023 IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships. 2023

AVALON

ASSISTANT SYSTEM FOR AIRBORNE VIDEO-BASED REAL-TIME ANALYSIS AND OBJECT RECOGNITION USING NEURAL NETWORKS

AUTOREN

CARSTEN SCHWARZ	ROCKWELL COLLINS DEUTSCHLAND GMBH
PELIN ÖZKIRAL	ROCKWELL COLLINS DEUTSCHLAND GMBH
DR. JAN POSPIŠIL	ROCKWELL COLLINS DEUTSCHLAND GMBH
RALF MÖLLERS	ELMA ELECTRONIC GMBH
FRITJOF STEINERT	FRAUNHOFER HHI, UNIVERSITÄT POTSDAM
PROF. DR. BENNO STABERNACK	FRAUNHOFER HHI, UNIVERSITÄT POTSDAM
PROF. DR. ANDREAS ZELL	EBERHARD KARLS UNIVERSITÄT TÜBINGEN
BENJAMIN KIEFER	EBERHARD KARLS UNIVERSITÄT TÜBINGEN
MARTIN MESSMER	EBERHARD KARLS UNIVERSITÄT TÜBINGEN
LEON VARGA	EBERHARD KARLS UNIVERSITÄT TÜBINGEN

1. HINTERGUND

Zur Lageaufklärung aus der Luft werden je nach Anforderung Satelliten, bemannte Fluggeräte und seit einigen Jahren auch Drohnen eingesetzt. Sobald eine hohe Auflösung und Echtzeitverarbeitung von Bildmaterial erforderlich ist, sind Satelliten ungeeignet und der Einsatz von bemannten Dreh- und Starrflüglern erweist sich als sehr kostspielig. An Land ist heute auch bei Sicherheitskräften der Einsatz von Drohnen zur Aufklärung der Lage aus der Luft nicht mehr neu. Tatsächlich kommen allerdings bei den Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) bisher lediglich Kleindrohnen – meist Quadrocopter – zum Einsatz, die üblicherweise mit stark eingeschränkten Möglichkeiten als "fliegende Kamera" mit einer kurzen Flugdauer (typischerweise ca. 20-30 min mit entsprechender Nutzlast) und damit nur über kurze Distanzen eingesetzt werden. Auch sind Kleindrohnen/Quadrocopter wetteranfällig für Wind und Regen. Für maritime Einsatzszenarien, wie die Grenzsicherung der Seegebiete, sowie Rettungs- und Suchmissionen usw., sind diese Kleinsysteme ungeeignet. Stattdessen werden z. Z. Hubschrauber und Flächenflugzeuge eingesetzt, was mit deutlich höheren Kosten verbunden ist.

Im Rahmen von Avalon wurde eine innovative Videobildübertragung mit adäquater Sensorik für großflächige Bilderfassung und KI basierter Bildauswertung entwickelt. Die Funktionalitäten wurden in eine sogenannte „Signal Processing Unit (SPU)“ integriert, die beispielhaft als Payload für fliegende Plattformen auf einer Mittelstreckendrohne mit einer Flugdauer von ca. 12 h für zivile Sicherheitsanwendungen eingesetzt werden kann.

Im Besonderen wurde eine Funktionalität „Region of Interest (ROI)“ entwickelt, welche hochauflösende Übertragung von mehreren flexibel wählbaren Bildausschnitten erlaubt, die (Drohnen-) Operateure am Boden signifikant bei den Suchaufgaben von Menschen und Objekten in Echtzeit unterstützen.

2. KONZEPTION DER SYSTEMARCHITEKTUR

Das in Avalon angewandte Funktionsprinzip wird in Abbildung 1 bildlich dargestellt.

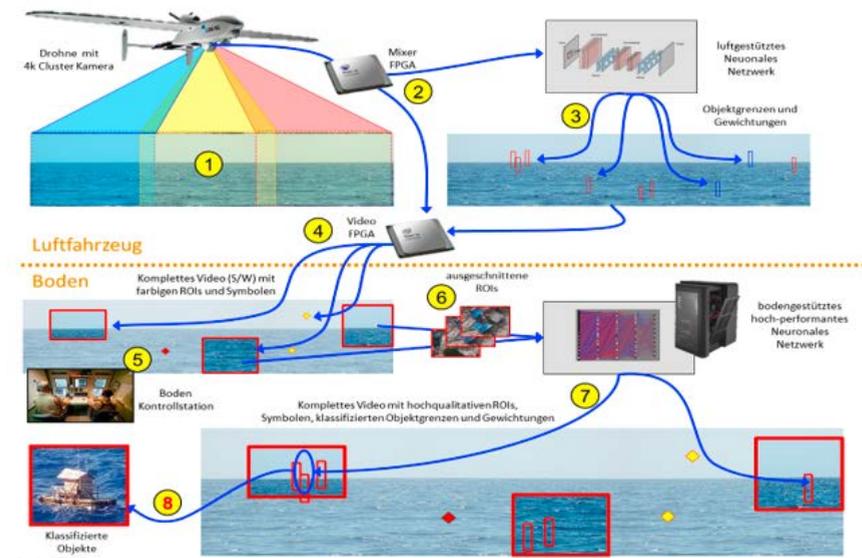


Abb. 1: Funktions- und Einsatzprinzip Avalon

(1) Zur Analyse großflächiger Seegebiete wird eine Mittelstreckendrohne, in unserem Beispiel die LunaNG der Firma Rheinmetall, zusätzlich zu den vorhandenen Taglicht- und Infrarot-Sensoren mit einer Cluster-Kamera ausgestattet. Diese besteht aus mehreren Einzelkameras, die im Zusammenspiel einen sehr weiten Blickwinkel gewährleisten.

(2) Die Videos der Cluster-Kameras werden an einer Video-Verarbeitungseinheit in der SPU zu einem Video mit einzelnen 4K UHD Bildstrom bereitgestellt. Ein Ausschnitt dieses Videos wird einem eingebetteten Neuronalen Netzwerk zur Analyse und Objekterkennung zugeführt, während das Video mit voller Auflösung parallel weitergereicht wird.

(3) Das eingebettete Neuronale Netzwerk kann „interessante“ Bildbereiche bzw. Anomalien erkennen und liefert als Ausgabe die Koordinaten von Objektgrenzen („Bounding Boxes“), die gefundene Bildbereiche markieren.

(4) Die identifizierten Koordinaten werden von der Video-Verarbeitungseinheit zur ROI Definition benutzt. Die ROI Bereiche werden im Stream FPGA hohe Qualität codiert

während die weniger relevanten Bereiche wie Wasser stark komprimiert werden. Eine Rate Control Funktion steuert die optimale Nutzung des Datenkanals.

(5) Das codierte Video wird mit Symbolkoordinaten und ROIs über die Datenverbindung der Drohne zur Bodenkontrollstation gesendet und dort wieder dekodiert. Kommandos bzw. Steuersignale werden über eine zweite Kommando- und Kontroll-Verbindung übertragen.

(6) Zur detaillierten Analyse wird das hochqualitative Videomaterial der ROIs automatisch aus dem Video ausgeschnitten und einem bodengestützten Neuronalen Netzwerk zugeführt. Das Netzwerk arbeitet auf einem KI-Computer mit hoch performantem Prozessor und mehreren GPUs.

(7) Der KI-Computer verwendet ein erheblich tieferes Neuronales Netz als die Komponente auf dem Flugzeug und bietet vergleichsweise nahezu unlimitierte Ressourcen zur Analyse und Objekterkennung. Der KI-Computer stellt das komplette Video dar. Dieses enthält die ROIs mit neuen Objektgrenzen, einer Klassifizierung (8) für die identifizierten Objekte und den Symbolen für weitere Bereiche, die nicht als ROI codiert wurden.

(8) Das komplette Bild wurde in die Bodenkontrollstation der LunaNG integriert und dem Bediener in Echtzeit zur Verfügung gestellt. Dieser kann am Boden zusätzlich die Darstellung dynamisch verändern, wie zum Beispiel ROIs selbst definieren oder deren Größe verändern.

3. SIGNAL PROCESSING UNIT (SPU) UND ERWEITERUNG DER BODEN-KONTROLLSTATION

Im Avalon Programm wurde die SPU (s. Abbildung 5: SPU Chassis) in den Payload Bereich der LunaNG Drohne integriert und am Boden um einen KI-Computer zur Objekterkennung erweitert.

Die SPU besteht aus den Hw Komponenten der Firma Elma Electronic, dem Video Processing Modul der Firma Collins Aerospace und einem marktverfügbaren KI Beschleuniger zum Hosten des DNN der Universität Tübingen. Der H.264 Encoder des Fraunhofer Heinrich Hertz Instituts wurde im sogenannten Stream FPGA des Videoprozessormoduls integriert.

3.1. VIDEO PROZESSOR MODUL

Das Video Prozessormodul VMX3 ist ein neues innovatives Konzept, das zur 2D Videoverarbeitung FPGAs verwendet und nach gängigen Luffahrtstandards (DO-178 und DO-254) entwickelt wurde. Diese Elektronikbausteine haben eine gering Leistungsaufnahme und sind wesentlich einfacher in der Zertifizierung als Graphikprozessoren. Die VMX3 Karte hat frei programmierbare Multiprotokoll Schnittstellen, sodass Geräte mit unterschiedlichen Datenstandards als Ein- oder Ausgabe verwendet werden können.

Im Rahmen von Avalon wurde die komplette HW und der Stream FPGA neu entwickelt. Für den Video Mixer FPGA wurde eine existierende Version angepasst und weiterentwickelt.

Der Video Mixer FPGA ist in der Lage verschiedene Video Streams, über verschiedene Schnittstellen, zu empfangen und zu verarbeiten. Die primäre Funktion ist die erhaltenen Datenströme zu einem einzigen Datenstrom zu verbinden. Dieser Datenstrom kann dann wiederum in bis zu 4 unabhängige Formate aufgeteilt und übermittelt werden. So können Bilder einer Cluster-Kamera verarbeitet werden oder mehrere Lagen als Ausgang erstellt werden.

Der Stream FPGA führt die Videokodierung per H.-264 Standard in Echtzeit durch und kann dabei mehrere dynamische ROI unterstützen. Das Video wird über den MPEG TS Standard gestreamed und nutzt dabei klassische UDP/IP-Protokolle. Eine besondere Herausforderung ist die Synchronisation der Zeit für alle Bearbeitungsschritte, um ein Video in Echtzeit zur Bodenkontrollstation zu senden.

3.2. H.264 VIDEO KOMPRESSIONSVERFAHREN

Das Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut hat im Rahmen des Avalon-Projektes eine echtzeitfähige, skalierbare H.264/AVC FPGA Videoencoderlösung mit sowohl Intra- als auch Inter-Kodierung für Bildgrößen von mindestens 3840x2160 Pixeln entwickelt. Eine Videocodierung ist notwendig, da eine uncodierte Übertragung das Bandbreitenlimit der Funkchnittstelle insbesondere mit steigender Flugentfernung der Drohne überschreiten würde. Unsere herstellerunabhängige Lösung entworfen in VHDL erreicht selbst auf kleinen, kostengünstigen FPGAs die nötige Kodiereffizienz, was den Entwurf von Boards mit günstigen SWaP (Size, Weight and Power)-Parametern ermöglicht.

Für die Encodierung wird das uncodierte Videobild entsprechend Abbildung 2 in parallele, vertikale Streifen aufgeteilt und separat von unabhängigen, HD-fähigen Videoencoderblöcken verarbeitet. Im Gegensatz zu einem einzelnen 4-k Encoder können parallele Encoder für die Codierung separater HD-Videoströme aus unabhängigen Bildquellen verwendet werden.

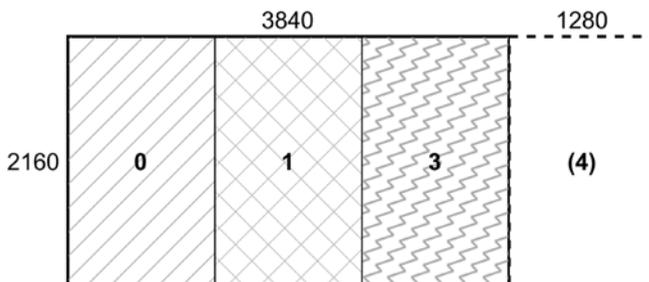


Abb. 2: Bildaufteilung auf parallele Encoderkomponenten

Jeder HD-Encoder kann Videoströme mit bis zu 30 Bildern pro Sekunde codieren. Dabei wird eine garantierte maximale, nahezu konstante Datenrate (capped Variable Bit Rate) sowie eine sehr geringe Latenz selbst mit Inter-Kodierung im Millisekundenbereich erreicht. Zusätzlich werden konfigurierbare ROIs unterstützt, welche im Vergleich zum Hintergrund mit verbesserter Bildqualität codiert werden. Die verbesserte Bildqualität ist notwendig, da insbesondere Klassifizierungsalgorithmen basierend auf Verfahren des maschinellen Lernens (ML) anfällig für Bildartefakte sind und im Vergleich zu einem menschlichen Betrachter schon bei besser Bildqualität ein Objekt falsch klassifizieren [11].

Die ROI werden auf Basis der 16x16 Pixel großen Makroblöcke (MB) von außerhalb des Encoders konfiguriert. Innerhalb einer ROI werden die MB mit einem geringeren QP codiert, was zu einer subjektiv besseren Bildqualität führt. Damit die Bitrate nicht das verfügbare Limit überschreitet, wird nicht direkt der QP der ROIs verringert sondern stattdessen der QP der Hintergrund-MB um eine QP-Differenz erhöht. Dies führt zu einer schlechteren Bildqualität und geringeren Bitrate. In einer Regelschleife wird nun die Bildqualität aller MB sukzessive erhöht indem der QP verringert wird, da die Zielbitrate unterschritten wird. Nach einigen Frames wird die Zielbitrate wieder erreicht und der QP innerhalb der ROIs ist geringer als außerhalb. Weitere Einzelheiten zum HD-Encoder werden in der Veröffentlichung von Steinert et al. [11] beschrieben.

Des Weiteren wurde eine Streamingkomponente bestehend aus Transportstromkodierung (MPEG TS) und latenzarmer Netzwerkschnittstelle (UDP/IP) entworfen. Die Transportstromkodierung ermöglicht in der Bodenkontrollstation die Rückgewinnung des Videotaktes, welcher für die Dekodierung benötigt wird. Über die Netzwerkschnittstelle wird eine flexible und kostengünstige Anbindung der Funkschnittstelle über das interne Netzwerk der Drohne erreicht. Die Implementierung des Netzwerkstacks wird von Schelten et al. [12] beschrieben.

Die Koordinaten der ROIs werden im Rahmen des Avalon-Projektes durch ML-Verfahren an Bord der Drohne mittels GPU detektiert. Für eine FPGA-Umsetzung mit reduzierten SwaP-Parametern wurde eine erste technische Studie [13] veröffentlicht. Es wurde der Entwurf und die Implementierung des YOLOv3-tiny DCNN mit unveränderter Genauigkeit mAP (Mean Average Precision) gegenüber der Referenzimplementierung und 36,3 Bildern pro Sekunde auf einem Mittelklasse-FPGA gezeigt.

3.3.ON-BOARD CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK

Das Ziel der ROI-Bestimmung ist, aus einem 4K-Video stream, der die Meeresoberfläche darstellt, interessante Regionen, oder auch sog. Anomalien, zu erkennen. Anomalien in diesem Kontext könnten zum Beispiel Boote, Personen oder andere Gegenstände sein, die sich auf der Meeresoberfläche bewegen. Die Aufgabe des Systems ist es, interessante Bereiche in jedem Frame zu identifizieren, die zur weiteren Untersuchung übertragen werden sollen.

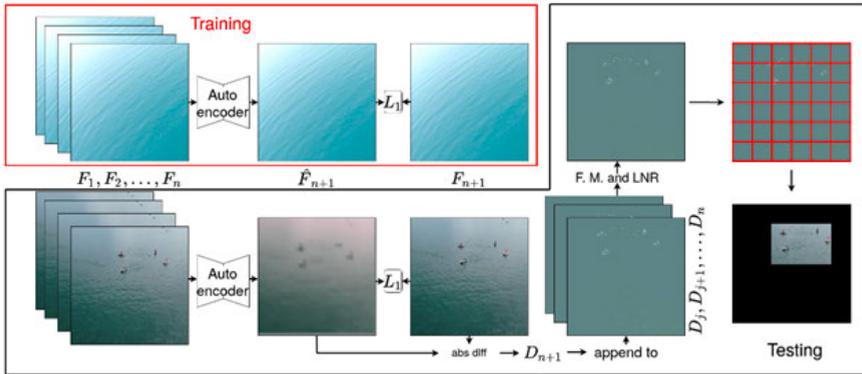


Abb. 3: Autoencoder-Trainings- und Inferenz-Ablauf. Zum Trainingszeitpunkt wird ein Autoencoder auf Sequenzen von normalen Bildern trainiert. Zum Testzeitpunkt werden Regionen mit schlechten Rekonstruktionswerten als Kandidatenregionen ausgewählt und mit weiteren Postprocessing-Schritten in ROIs verwandelt

Unsere Methode basiert auf einem Autoencoder mit wenigen Schichten, der auf Sequenzen von normalen Bildern, die die Meeresoberfläche darstellen, trainiert wird. Normale Bilder sind Bilder, auf welchen keine Anomalie zu sehen ist. Dieses Modell lernt, das nächste normale Bild vorherzusagen. Danach wird das vorhergesagte Bild vom tatsächlichen nächsten Bild subtrahiert. Die Hypothese hinter diesem Ansatz ist, dass der Autoencoder Probleme hat, Objekte zu rekonstruieren, die sich in Farben, Formen und Texturen von der Meeresoberfläche unterscheiden. Durch die Einbeziehung der letzten Frames lernt der Autoencoder weiterhin zeitliche Korrelationen von Wasserbewegungen. Eine Illustration des Ablaufs ist in Abbildung 9 zu sehen.

Die vorgeschlagene Methode enthält außerdem eine Komponente zur Reduzierung von lokalem Rauschen, das durch Sonnenreflexionen und Wellenmuster verursacht wird. Durch weiteres Mitteln von erkannten Anomalien in der Zeitdimension, wird die Verlässlichkeit des Systems erhöht.

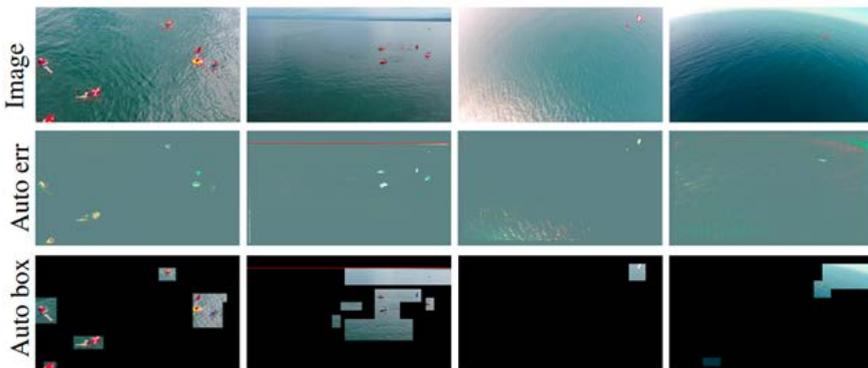


Abb. 4: Beispielerkennungen anhand von Testdaten des Datensets SeaDronesSee und Seagull. Die erste Zeile zeigt die 4K-Bilder, die Zeile darunter die rekonstruierten Versionen und unten die daraus resultierenden ROIs

Abschließend wird ein Gitter fixer Auflösung auf das Fehlerbild angewendet und für jedes Gitterfenster wird über die darin enthaltenen Fehlerbild-Pixel gemittelt. Es wird eine maximale Anzahl von Boxen ausgegeben, welche von dem Encoder vorgegeben wird. Diese Methode ermöglicht es, eine Vielzahl von Anomalien in Echtzeit zu erkennen und für die weitere Untersuchung auszuwählen. In Abbildung 10 ist exemplarisch zu sehen, wie der Autoencoder Anomalien erkennt und wie die daraus resultierenden ROIs aussehen.

3.4. CHASSIS DESIGN

Im Rahmen des Projektes wurde ein auf den Standard VITA 46 basierendes VPX System entwickelt, welches in den vorgegebenen Raum (Größenvorgabe) der Drohne eingebaut wurde. Weitere wesentliche Bestandteile des Conduction-Cooled-Systems sind

- › VPX Backplane zur Übertragung der High-Speed Signale
- › Stromversorgung für die Baugruppen im System selbst
- › Filterelektronik für den Video-Prozessor

Das Hauptaugenmerk für die Entwicklung der Hardware war es u.a. folgende Anforderungen einzuhalten.

a) VPX Backplane: Unterstützung von Übertragungsraten von bis zu von 16 GT/s bzw. Kompatibilität zur „PCI Express Generation 4“.

b) Chassis: Ausreichende und zuverlässige Kühlung unter Berücksichtigung von Gewichtsaspekten für die Anwendung in einem Fluggerät.

Darüber hinaus Auslegung des Designs und Auswahl des Materials, um die beim Katalpult-Start der Drohne auftretenden hohen G-Kräfte gerecht zu werden.

c) Gesamtsystem: Auslegung der Filterelemente für Signale und Spannungsversorgung für die elektromagnetische Verträglichkeit.



Abb. 5: SPU Chassis

3.5. BODENKONTROLLSTATION (KI COMPUTER)

Bei der Bodenkontrollstation handelt es sich um einen GPU-Server mit GPUs von Nvidia, auf dem die Erkennung der Objekte in den mit hoher Qualität übertragenen ROIs in Echtzeit erfolgt. Da im Projekt auf diesem Server auch das Training der neuronalen Netze erfolgte wurde er mit 8 Nvidia RTX A5000 ausgestattet.

Die Software, welche auf der Bodenkontrollstation läuft, wird Assistance System bezeichnet und besteht aus drei Software-Komponenten. Die erste Komponente ist für die Kommunikation über den digital Datenlink mit der SPU zuständig. Neben den übertragene ROIs müssen auch die weiteren Payload Daten (z. B. Konfigurationsdaten für die Object Pre-Selection) von dieser Komponente übertragen und empfangen werden.

Die zweite Komponente stellt das Kernstück der Anwendung dar und behandelt die Detektion auf den hochwertigen ROIs. Mit Hilfe eines tiefen neuronalen Netzes, in diesem Fall einer optimierten Form von Faster R-CNN, wird in den vorselektierten Bereichen die Detektion nach den gesuchten Objektklassen durchgeführt (s. Abbildung 7). Für das Training dieses tiefen neuronalen Netzes wurden in zwei Flugkampagnen mit Hilfe einer Anzahl kleinerer Drohnen Trainingsbilder von Personen und Objekten im Wasser aufgenommen (s. Abbildung 5). Die Aufnahmen wurden mit verschiedenen Drohnen und Kamerasystemen durchgeführt, um möglichst unterschiedliche Lichtbedingungen zu erfassen und eine hohe Varianz der Daten zu erreichen.

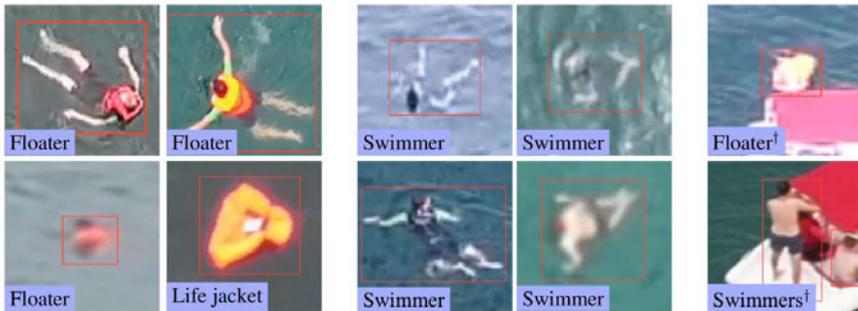


Abb. 6: Personen und Objekte, die von verschiedenen Drohnen mit unterschiedlichen Kameras am Bodensee aufgenommen wurden.

Nach Abschluss der Flugkampagne wurden etwa 27.000 Aufnahmen analysiert, bereinigt und für die Labeling-Phase vorbereitet. Hierbei wurden die Daten in Arbeitspakete unterteilt, um sicherzustellen, dass alle relevanten Situationen (wie Flughöhe, Kamera-winkel und Beleuchtung) gleichermaßen im endgültigen Datensatz repräsentiert sind.

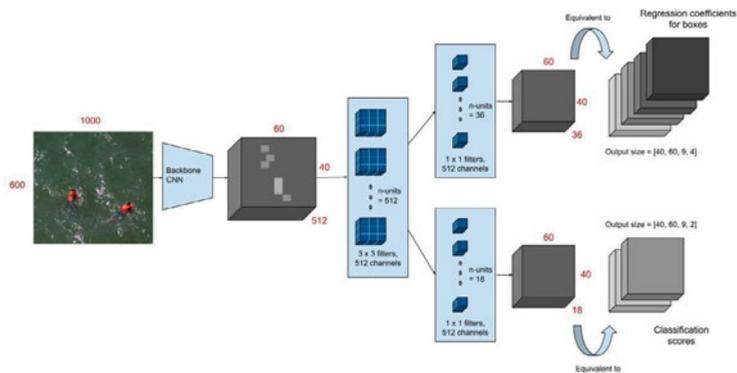


Abb. 7: Verwendetes Netzmodell mit 2 „Köpfen“ (dual head) zur Klassifikation von Schwimmern und Bestimmung ihrer Position und Größe im Bild (bounding boxes).

Die letzte Komponente stellt die so resultierenden Informationen dem Benutzer in aufbereiteter Form als GUI dar. Neben der reinen Darstellung ermöglicht die GUI auch das Konfigurieren der Detektions-Pipeline. So können Einstellungen (Grenzwerte für die Detektionen) oder benutzerdefinierte ROIs gesetzt werden.

4. ERGEBNISSE UND AUSBLICK

Das Avalon Konsortium hat im Flugversuch demonstrieren können, dass eine KI basierte Videoanalyse mit ROI spezifischer Videobildübertragung für hochauflösende 4k Bilder in Echtzeit funktioniert. Die Abbildung 8 zeigt exemplarisch das Resultat. Automatisch identifizierte Bereiche höherer Bedeutung (ROIs) werden in hoher Qualität übertragen und mit einem Rahmen markiert. Bereiche mit geringer Bedeutung, wie zum Beispiel Wasser, werden stark komprimiert, um Datenbandbreite einzusparen. Am Boden kann trotz des Komprimierungsvorgangs ein tieferes Neuronales Netzwerk angewandt werden, um die identifizierten Bereiche in Objektklassen zu sortieren.



Abb. 8: Dekodiertes Bild mit ROIs

Die besondere Herausforderung war die Integration der einzelnen Elemente aller Partner sowohl auf SPU als auch auf Luftfahrzeugebene, um die abschließenden Tests zur Erlangung der Erlaubnis zum Experimentalflug zu erhalten.

Optimierungspotential gibt es sowohl bei den KI-Trainingsdaten als auch bei Gewicht und Größe der SPU. Da die Flugtests am Ende des Projekts stattgefunden haben, konnten keine große Menge an Trainingsdaten zur Optimierung und Training der KI generiert werden. Als Mitigation wurden im Verlauf des Projektes Daten mit anderen Plattformen generiert. Als Experimentaleinheit musste die SPU für eine maximale Leistungsaufnahme ausgelegt werden. Eine Präzisierung der Anforderungen lässt eine signifikante Reduzierung besonders im Bereich der Kühlkörper zu.

Die Fähigkeiten der SPU können noch erweitert werden. Zusätzliche Sensordaten, wie zum Beispiel GPS können zur umfangreicheren Auswertung der Bilder und einer optimierten Suche beitragen. Eine Erweiterung der KI für zusätzliche Anwendungsfälle, auch außerhalb von Wasser, lässt die aktuelle Architektur der SPU zu.

LITERATUR

- [1] Benjamin Kiefer, et al. 1st Workshop on Maritime Computer Vision (MaCVi) 2023: Challenge Results. In Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV) Workshops, 2023.
- [2] Benjamin Kiefer, Andreas Zell. "Fast Region of Interest Proposals on Maritime UAVs" (2022, accepted for publication at ICRA 2023)
- [3] Benjamin Kiefer*, David Ott* and Andreas Zell. "Leveraging Synthetic Data in Object Detection on Unmanned Aerial Vehicles" , 2022 26th International Conference on Pattern Recognition (ICPR). (*equal contribution)
- [4] Leon Amadeus Varga, Andreas Zell. "Tackling the Background Bias in Sparse Object Detection via Cropped Windows". In 2021 ICCV Workshop Vision Meets Drones, virtual, October 2021.
- [5] L. A. Varga*, B. Kiefer*, M. Messmer*, and A. Zell, "SeaDronesSee: A Maritime Benchmark for Detecting Humans in Open Water," in Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV), January 2022, pp. 2260–2270. (*equal contribution)
- [6] Martin Meßmer*, Benjamin Kiefer* and Andreas Zell. "Gaining Scale Invariance in UAV Bird's Eye View Object Detection by Adaptive Resizing", 2022 26th International Conference on Pattern Recognition (ICPR). (*equal contribution)
- [7] B. Kiefer*, M. Messmer* and A. Zell, "Diminishing Domain Bias by Leveraging Domain Labels in Object Detection on UAVs," 2021 20th International Conference on Advanced Robotics (ICAR), 2021, pp. 523530, doi: 10.1109/ICAR53236.2021.9659357. (*equal contribution)
- [8] P. Ruiz-Ponce, D. Ortiz-Perez, J. Garcia-Rodriguez, B. Kiefer: POSEIDON: A Data Augmentation Tool for Small Object Detection Datasets in Maritime Environments, In Sensors 23.7 (2023).
- [9] B. Kiefer, T. Höfer, A. Zell: Stable Yaw Estimation of Boats from the Viewpoint of UAVs and USVs. Accepted at European Conference on Mobile Robots, ECMR 2023.
- [10] Benjamin Kiefer, Yitong Quan, Andreas Zell; Memory Maps for Video Object Detection and Tracking on UAVs (preprint)
- [11] Fritjof Steinert and Benno Stabernack. 2022. Architecture of a Low Latency H.264/AVC Video Codec for Robust ML based Image Classification: How Region of Interests can Minimize the Impact of Coding Artifacts. J. Signal Process. Syst. 94, 7 (Jul 2022), 693–708. <https://doi.org/10.1007/s11265-021-01727-2>
- [12] Niklas Schelten, Fritjof Steinert, Anton Schulte and Benno Stabernack, 2020, A High-Throughput, Resource-Efficient Implementation of the RoCEv2 Remote DMA Protocol for Network-Attached Hardware Accelerator, 2020 International Conference on Field-Programmable Technology, DOI: 10.1109/ICFPT51103.2020.00042

- [13] Viktor Herrmann; Justin Knapheide; Fritjof Steinert; Benno Stabernack, A YOLO v3-tiny FPGA Architecture using a Reconfigurable Hardware Accelerator for Realtime Region of Interest Detection 2022 25th Euromicro Conference on Digital System Design (DSD) , DOI: 10.1109/dsd57027.2022.00021

UWSENSOR

ENTWICKLUNG EINES AUF PROJEKTION STRUKTURIERTER LICHTMUSTER
BASIERENDEN ECHTZEITFÄHIGEN UNTERWASSER-3D-SENSORS

AUTOREN

DR. CHRISTIAN BRÄUER-BURCHARDT	FRAUNHOFER IOF JENA
MICHAEL BLEIER	JMU WÜRZBURG
DR. CHRISTOPH MUNKELT	FRAUNHOFER IOF JENA
DIRK FROMME	3PLUSPLUS GMBH SUHL
STEFAN MARX	OKTOPUS GMBH HOHENWESTEDT
CHRISTIAN DETTMER	SEARENERGY GMBH & CIE. HAMBURG
DR. PETER KÜHMSTEDT	FRAUNHOFER IOF JENA
PROF. DR. GUNTHER NOTNI	FRAUNHOFER IOF JENA

1. EINLEITUNG

Genauere 3D-Messungen von Unterwasserobjekten erlangen für unterschiedliche Anwendungen, wie zum Beispiel im Energiesektor eine immer größere Bedeutung. Offshore-Strukturen wie Öl- und Gaspipelines oder Fundamente von Windkraftanlagen und Ölplattformen erfordern regelmäßige Inspektionen und Wartung, um Abmessungen zu überprüfen, kleine Schäden zu erkennen oder das Auftreten von Korrosion zu überwachen [1]. Archäologen und Denkmalschützer interessieren sich für die Dokumentation von Unterwasserstandorten [2, 3], für die 3D-Rekonstruktion von Schiffswracks [4, 5] oder für die Erkundung von Höhlen [6], einschließlich ihrer 3D-Kartierung. Biologen dokumentieren das Wachstum des Meeresbodens, beobachten den Zustand und die zeitliche Entwicklung von Korallenriffen [7] oder bestimmen die Größe bestimmter Fischarten [8]. Geologen nutzen Messdaten zur Modellierung des Sedimenttransports.

Für die dreidimensionale Rekonstruktion von Messobjekten unter Wasser gibt es verschiedene Ansätze. Je nach Einsatzbereich werden dabei unterschiedliche zugrunde liegende Messprinzipien verwendet. Kommerziell am Markt verfügbare Systeme lassen sich dabei in drei grundlegende Verfahren gruppieren. Die Systeme basieren zum einen auf Fotogrammetrie [9, 10], Lasertriangulation [11] oder auf der Laufzeitmessung von Lichtimpulsen. Weiterhin werden akustische Verfahren [12] für die grobe Erfassung von Unterwasser-3D-Geometrien angewendet. Die optische Vermessung mittels Stereokameratechnik und zusätzlichen strukturierten Lichtmustern, die auf das Messobjekt projiziert werden, bietet im Vergleich zu fotogrammetrischer Vermessung oder Lasertriangulation eine höhere Messgenauigkeit. Ihre Anwendung unter Wasser steht allerdings aufgrund besonderer Herausforderungen noch in den Anfängen. Erste Anwendungen mit Labormuster-Messsystemen gibt es seit reichlich zehn Jahren [13-15]. Die Arbeiten zeigen die prinzipielle Eignung des Messprinzips für die Unterwasser-Anwendung sowie Möglich-

keiten und Grenzen des Verfahrens. Im bearbeiteten Vorhaben wurde die musterprojektionsbasierte optische Stereo-Messtechnik zum Kernstück des entwickelten Unterwasser-3D-Messsystems. Weitere Aufgaben waren die simultane Lokalisierung des Sensorsystems und die Kartierung des Meeresbodens unter der abgefahrenen Strecke.

2. UNTERWASSER-3D-SENSORSYSTEM

2.1 Sensorsystem-Hardware

Hauptkomponente des Unterwasser-3D-Sensorsystems (im Folgenden auch UWS genannt) ist ein auf strukturierter Beleuchtung basierender Stereosensor. Die Projektionseinheit nutzt die GoBo-Technik [16] zur Erzeugung aperiodischer sinusförmiger Streifenmuster. Als Lichtquelle kommt eine leistungsstarke LED zum Einsatz und die Geometrie des GoBo-Rades ist speziell auf maximalen Kontrast und Eignung für die gewünschten Bildraten ausgelegt. Auch die Rotationsgeschwindigkeit des Rades wird entsprechend der gewählten Bildrate optimiert. Die Generierung hochauflöster 3D-Daten basiert auf Korrespondenzfindung und Stereotriangulation anhand der zeitlichen Grauwertsequenzkorrelation. Die Sequenzlänge beträgt normalerweise zehn Bilder und es wird eine 2D-Bildfrequenz von bis zu 900 Hz verwendet. Der Stereosensor erfasst kontinuierlich 3D-Daten in einer typischen Entfernung von zwei Metern mit einem Sichtfeld von etwa einem Quadratmeter. Die stark überlappenden 3D-Punktwolken werden zu einem gemeinsamen 3D-Modell der beobachteten Objekte zusammengeführt. Gleichzeitig werden Farbbilder mit einer Auflösung von 7 Mpix aufgenommen, die ein Sichtfeld in zwei Metern Entfernung von etwa 2 m x 2 m abdecken. Die Steuereinheit des Systems löst die Aufnahmen abwechselnd aus. Die Farbkameraaufnahme wird für eine optimale Ausleuchtung mit Blitzlicht synchronisiert, während die LED-Beleuchtung des strukturierten Lichtmusters während der Farbkamerabelichtung ausgeschaltet ist. Um die störende Wirkung des Blitzlichts auf die strukturierte Beleuchtung zu minimieren, liegen zwischen den Aufnahmen der Farb- und Monochromkameras kurze belichtungsfreie Zeiträume.

Die Hauptkomponenten des Sensorsystems sind in fünf Unterwassergehäuse eingebaut, wodurch das System für Tiefen bis zu 1000 Metern einsetzbar ist (siehe Abb. 1). In den äußeren beiden Gehäusen befinden sich die beiden monochromen Messkameras (4 Mpix). Ein Gehäuse beinhaltet die Projektionseinheit, bestehend aus einer LED-Lichtquelle (450 nm), einem GoBo-Rotationsrad [16], das das aperiodische sinusförmige Streifenmuster enthält, einen Drehmotor und die Projektionslinse. Das vierte Gehäuse enthält die Farbkamera und eine Inertialmesseinheit (IMU). Alle vier Gehäuse sind auf einer Karbonstange befestigt, die schwingungsentkoppelt vom Trägerrahmen ist. Dadurch wird eine hohe Kalibrierstabilität des Sensorsystems gewährleistet. Zusätzlich sind an den Seiten des Sensorträgers zwei LED-Blitzeinheiten angebracht, die das Messobjekt beleuchten, aber die Beleuchtung von Partikeln im Nahbereich verhindern, um Streueffekte zu vermeiden. Ein fünftes Gehäuse, das keiner geometrischen Anpassung zu den anderen Gehäusen bedarf, enthält die Elektronik zur Stromversorgung und die Netzwerktechnik zur Datenübertragung. Alle Daten werden über ein Netzwerk mithilfe der

Glasfaserverbindung des ROV übertragen. Die 3D-Berechnung und Datenanalyse erfolgt über Wasser auf dem Schiff an einem PC-Arbeitsplatz, der über ein Zehn-Gigabit-Glasfaserkabel direkt mit dem Sensorsystem verbunden ist.

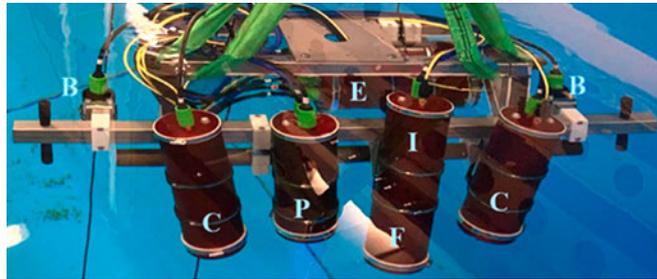


Abb. 1: UWS-Sensorsystem bestehend aus Messkameras (C), Blitzlichtern (B), Projektionseinheit (P), Elektronik-Steuerbox (E), Farbkamera (F) und IMU (I) bei der Kalibrierung im Wasserbecken

Das neue Unterwasser-Messsystem weist die folgenden Merkmale auf:

- › Abmessungen: 1,2 m x 0,7 m x 0,5 m (ca.)
- › Masse: ca. 65 kg
- › Oberflächenbasierte 3D-Erfassung und Zusammenfügung der Datensätze in ein 3D-Oberflächenmodell
- › Messvolumen von etwa 0,9 m x 0,8 m x 0,8 m bei einer mittleren Scanentfernung von 2 m für einen Einzel-Scan
- › Einsatzbereich Tiefsee: bis 1000 m
- › hohe Dichte an 3D-Punkten (typischerweise eine Million 3D-Punkte pro Scan)
- › 3D-Scanrate von 50 Hz
- › gleichzeitige Aufnahme von hochauflösenden Farbbildern mittels LED-Blitz
- › Integration der Farbbilddaten in das 3D-Modell
- › automatische Bewegungskompensation basierend auf visueller und inertialer Odometrie [17] während der Bildaufnahme
- › Bewegungs-Geschwindigkeit des Sensors bei 3D-Datenaufnahme: max. 1 m/s
- › grafische Benutzeroberfläche inklusive Echtzeitvisualisierung zur Qualitätskontrolle und Unterstützung des ROV-Piloten bei der Bildaufnahme
- › geringer systematischer Messfehler unter 1 mm im gesamten Messvolumen

Das Sensorsystem wurde als Demonstrator-System in zwei Ausführungen mit identischen Hardwarekomponenten aufgebaut (Abb. 2). Die Unterschiede bestehen in verschiedenen Basislängen zwischen den beiden Messkameras. Das zweite System besitzt eine von etwa 1,0m auf ca. 0,7cm verkürzte Basislänge. Gleichzeitig wurde die Standard-Messentfernung von 2,0m auf 1,3m reduziert. Damit wird auch kleineres Bildfeld von ca. 0,7m x 0,6m erreicht. Vorteile der kompakteren Variante sind eine etwas leichtere Manövrierfähigkeit durch die geringeren Ausmaße des Systems und eine höhere Lichtausbeute durch die kürzere Messentfernung. Allerdings reduziert sich der Messabstand des Sensors, welcher dichter an das Messobjekt positioniert werden muss. Folglich erhöhen sich die Anforderungen des ROV-Piloten hinsichtlich der Navigation, da Kollisionen sowohl das Sensorsystem als auch die Messobjekte beschädigen können.



Abb. 2: UWS-Sensorsystem Variante 1 (UWS1) am ROV montiert vor dem Offshore-Einsatz (links) und Variante 2 (UWS2) bei der Luft-Kalibrierung (rechts)

2.2 User-Interface

Ein Schlüsselfaktor für den effektiven Einsatz des Sensors für Messanwendungen ist die Benutzeroberfläche, die im Rahmen des Projekts entwickelt wurde. Diese Software bietet eine Visualisierung für den ROV-Piloten sowie die Schnittstelle für den Betreiber des Sensorsystems. Ein Beispiel ist in Abb. 3 gezeigt.

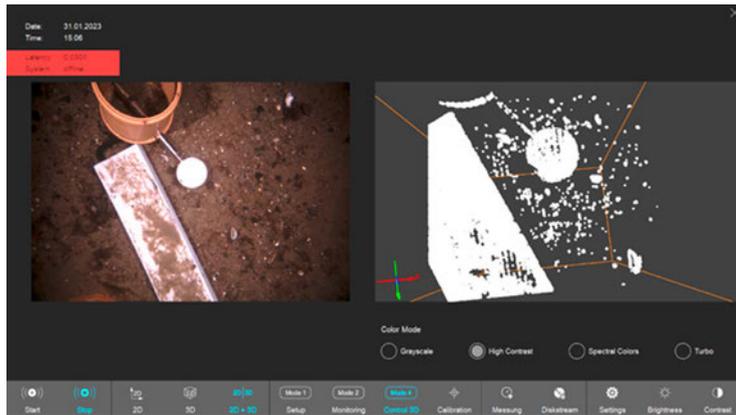


Abb. 3: Benutzeroberfläche der Monitoring-Software mit Live-Anzeige der Farbkamera (links) und Echtzeit-Darstellung von 3D-Punkten (rechts)

Die Software übernimmt die Parametrierung der Sensoren, um Belichtungszeit und Lichtempfindlichkeit schnell an die Umgebungsbedingungen im Wasser anzupassen. Sie hilft bei der Erkennung fehlerhafter Aufnahmen in bestimmten Bildbereichen und zeigt das 3D-Rekonstruktionsergebnis zur Qualitätskontrolle direkt an. Darüber hinaus ermöglicht die Benutzeroberfläche die Steuerung der Datenstromaufzeichnung sowie das Auslösen einzelner Aufnahmen, z. B. im Rahmen des Kalibrierverfahrens oder der 3D-Messung. Dem ROV-Piloten wird in einer gesonderten Softwareapplikation der Farbbildstrom mit kurzer Latenzzeit angezeigt. Das Farbbild lässt sich individuell, während des Betriebs an die Umgebungsbedingungen durch diverse Optionen der Kontrastverbesserung anpassen. Unterstützend zur Navigation wird zudem der Messabstand farblich ausgegeben. Eine Visualisierung der 3D-Daten, die schwieriger zu interpretieren sind als Farbbilder, ist für den ROV-Piloten nicht notwendig. Zur Visualisierung des kompletten 3D-Modells wurde eine browserbasierte Lösung mit Potrees [18] entwickelt. Dazu gehören die Benutzerverwaltung, die Organisation in Scanprojekten und die automatisierte Generierung von Vorschaubildern der Punktwolken. Um den Fernzugriff und die 3D-Datenbeobachtung ohne spezielle 3D-Softwaretools zu ermöglichen, wurde die Web-Technologie gewählt. Das bedeutet, dass alle Interessenten die Daten selbstständig beobachten und analysieren können. Darüber hinaus ermöglicht es die Datenübertragung über ein Mobilfunknetz oder eine Satellitenverbindung zwischen dem Messort und einem Bürostandort. Dies fördert die parallele Datenanalyse und kann den Personalaufwand auf dem Schiff während des Messvorgangs reduzieren.

3. 3D-MESSUNGEN

Das Messsystem erfasst kontinuierlich Bilddaten mit einer Frequenz von bis zu 900 Bildern pro Sekunden mit beiden Messkameras. Zusätzlich werden typischerweise 25 Farbbilder pro Sekunde gespeichert. Die 3D-Messdaten werden nach dem bekannten Triangulationsprinzip [19] berechnet. Hierfür muss eine entsprechende Vorverarbeitung der Bilddaten erfolgen.

3.1 Kamera-Modellierung, Kalibrierung und 3D-Datenberechnung

Die Modellierung des Strahlverlaufs kann nicht analog zum Fall an Luft erfolgen, da an den Übergängen von Luft zu Glas (im Unterwassergehäuse) und von Glas zu Wasser (außen am Gehäuse) eine Strahlbrechung entsprechend dem Snell'schen Gesetz erfolgt. Die meisten Anwendungen, die eine hohe 3D-Messgenauigkeit unter Wasser erfordern, verwenden eine explizite Modellierung der Refraktion. Hierfür sind neben den bekannten Brechungsindizes der beteiligten Medien (Luft, Glas, Wasser) noch weitere Parameter des Systems bei der Kalibrierung zu bestimmen. Ausführliche Beschreibungen findet man u. a. bei Sedlacek [20], Telem und Filin [21] sowie Maas [22]. Einen Überblick über die meisten Kalibrierverfahren für den Unterwassereinsatz findet man z. B. bei Shortis [23].

Für die Kalibrierung des Stereosensors des UWS wurde ein erweitertes Lochkamera-modell verwendet. Dabei ist die Gültigkeit bestimmter Voraussetzungen erforderlich, wie z. B. die Orthogonalität der Kameraausrichtung bezüglich des planaren Sichtglasfensters des Unterwassergehäuses. Eine ausführliche Darstellung des speziell für das UWS entwickelten Kameramodells und des entsprechenden Kalibrierverfahrens findet man in [24-26].

Zur Vorbereitung der Kalibrierung werden zunächst die Anzahl der Aufnahmen und die jeweiligen Positionen des UWS festgelegt. Die Kalibriermuster, d. h. in diesem Fall Platten mit sogenannten ArUco-Marker-Platten [27] (siehe Abb. 4), werden auf dem Boden des Wasserbeckens ausgelegt oder an der Seitenwand befestigt. Das UWS wird an einer beweglichen und steuerbaren Halterung, z. B. einem Kran, einer Verfahr-Schiene oder einem manuellen Halteseil befestigt. Die Positionierung des UWS in die vorgegebenen Positionen bzgl. des Kalibrierusters erfolgt mittels der Halterung.

Die Aufnahme der Kalibriermuster als Bildfolge erfolgt entsprechend den festgelegten Aufnahmepositionen beim langsamen Vorbeifahren an den Kalibriermustern ($v < 0,1 \text{ m/s}$). Auswahl und Berechnung der Kalibrierpunkte erfolgen durch eine geeignete Software (Punktauswahl: IOF-eigenes Software-Modul, Berechnung: BINGO-Software [28]) realisiert. Die Evaluierung der Kalibriergüte kann durch eine 3D-Messung von Testmesskörpern, wie Kugelstäben oder Ebenen-Normale, und eine Bewertung dieser Messergebnisse erfolgen. Die Kalibrierung soll unmittelbar vor dem Messeinsatz durchgeführt werden. Bei Messungen im Wasserbecken erfolgt die Kalibrierung unter denselben Bedingungen. Vor einem Offshore-Messeinsatz sollte die Kalibrierung, wenn möglich, auch unter vergleichbaren Wasserbedingungen wie bei der Messung (Wassertemperatur, Salzgehalt, Sichtbedingungen) erfolgen. Ist dies aus Gründen der Handhabbarkeit nicht möglich, muss davon ausgegangen werden, dass die Kalibrierung eine höhere Unsicherheit besitzt. Entsprechend muss mit höheren Messfehlern gerechnet werden. Abbildung 4 zeigt die für die Kalibrierung verwendeten ArUco-Markerplatten.

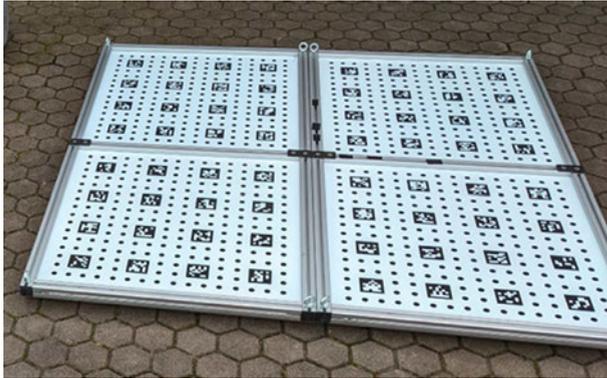


Abb. 4: ArUco-Markerplatten für die Kalibrierung

3.2 Bewegungskompensation

Für die geplante Anwendung bei Inspektionsaufgaben geht man von mittleren ROV-Geschwindigkeiten zwischen 0,1 m/s und 1,0 m/s aus. Trotz der hohen Bildaufnahme-frequenz von bis zu 900 Hz und der damit einhergehenden geringen „Objektbe-wegung“ von Bild zu Bild ergeben sich durch die Länge einer Bildsequenz von zehn Folgebildern nicht vernachlässigbare Verschiebungen des Bildinhalts während einer Sequenz, die für einen 3D-Scan notwendig sind. Diese Verschiebung beträgt bei einer Geschwindigkeit von 1 m/s über eine Sequenz von zehn Folgebildern bei 900 Hz etwa zwölf Pixel. Dies verursacht insbesondere in vertikaler Bildrichtung nicht zu vernachlässi-gende Bildstörungen, die Fehler bei der 3D-Rekonstruktion generieren bzw. zur Nicht-Messbarkeit führen können.

Um diese Fehler zu reduzieren, wurde ein Algorithmus zur Bewegungskompensation entwickelt. Dieser Algorithmus beruht auf der Annahme einer konstanten, geradlinigen Bewegung über den Zeitraum der Aufnahme einer Bildsequenz von zehn Bildern. Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit werden aus den Bilddaten und den IMU-Daten geschätzt. Eine ausführliche Beschreibung des Verfahrens ist in [29] dokumentiert. Ab-bildung 5 zeigt am Messbeispiel eines Rohres den Effekt der Bewegungskompensation.

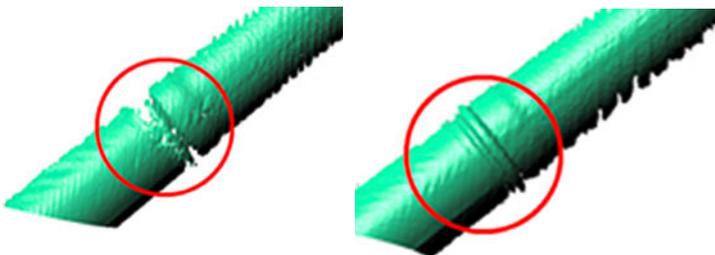


Abb. 5: Bewegungskompensation bei Rohrmessung: ohne (links) und mit Korrektur (rechts)

3.3 Generierung von 3D-Modellen

Die Zusammenführung einzelner Scans zu einem vollständigen 3D-Modell erfolgt anhand der IMU-Daten und der von der Stereokamera gewonnenen einzelnen 3D-Scans. Die Qualität der Ergebnisse variiert je nach Wasserqualität, Sensorgeschwindigkeit und den Eigenschaften der Objekt Oberfläche. Komplette 3D-Modelle mehrerer Objekte konnten mithilfe von 3D-Messdaten und Farbkamerabildern sowohl im Wasserbecken als auch vor der Küste erfolgreich erstellt werden (siehe Abschnitt 4).

4. EXPERIMENTE UND ERGEBNISSE

Nach Aufbau des ersten Demonstrator-Systems wurden zunächst Messungen im Klarwasserbecken durchgeführt. Dazu wurde zunächst das System entsprechend dem beschriebenen Verfahren kalibriert. Die Experimente betrafen in erster Linie Funktionstests, Untersuchungen zur Messgenauigkeit, die Evaluierung des Verfahrens zur Bewegungskompensation und der Test des 3D-Modellaufbaus. Die Navigation des Sensorsystems erfolgte mit Hilfe eines Krans und einer Verfahr-Einheit. Nach Aufbau des zweiten Demonstrator-Systems wurden Offshore-Messungen in der Ostsee vor der Küste Nienhagens durchgeführt. Dabei wurde das Sensorsystem an ein Work-Class-ROV montiert und von einem Schiff aus gesteuert.

4.1 Messungen im Wasserbecken

Bei den Messungen im Wasserbecken wurden Messungen unter dem Gesichtspunkt der erreichbaren 3D-Messgenauigkeit und der Erstellung eines vollständigen 3D-Modells aus den Einzelscans durchgeführt. Abbildung 6 dokumentiert die Realisierung der kompletten Erfassung eines ca. 7 m langen Rohrstücks mit Knick, welches auf dem Beckenboden platziert wurde, Abb. 7 zeigt einige Testmesskörper. Der Kugelstab besitzt eine kalibrierte Länge zwischen den Kugelmittelpunkten von 497,612 mm.

Um die 3D-Messgenauigkeit bewerten zu können, wurden in Anlehnung an die VDI-Norm [30] Kugelstäbe mit kalibrierten Kugelradien und Kugelabständen vermessen. Die mittleren Messfehler bei der Kugelabstandsabweichung und der Ebenheitsabweichung sind in den Tabellen 1 und 2 dokumentiert. Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse zur Messgenauigkeit findet man in [25, 26].

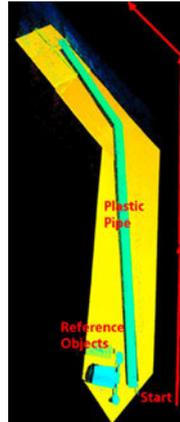
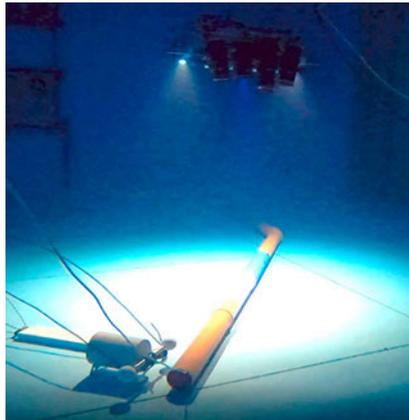


Abb. 6: Messszene mit Rohr und Testmesskörpern (links) und 3D-Falschfarbendarstellung der gemessenen Szene (rechts)

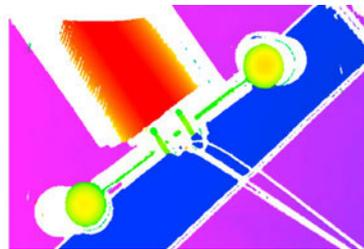
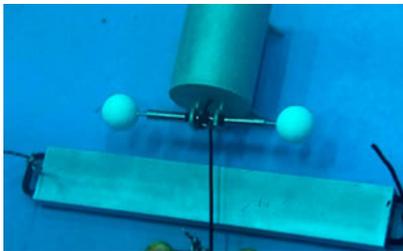


Abb. 7: Foto (links) und 3D-Falschfarben-Darstellung der Testmesskörper Zylinder, Ebenen-Normal, Kugelstab (rechts)

Tab. 1: Längenmessfehler und 3D-Rauschen auf Kugeloberflächen, Anzahl der Wiederholungsmessungen: drei bis vier

Messentfernung [m]	Längenmessfehler [mm]	Mittleres 3D-Messrauschen [mm]
1,6	-0,22 ± 0,07	0,07
1,8	0,07 ± 0,02	0,09
2,1	0,03 ± 0,05	0,11
2,4	0,01 ± 0,13	0,15

Tab. 2: Ebenheitsfehler und 3D-Rauschen auf Ebene, Anzahl der Wiederholungsmessungen: drei bis vier

Messentfernung [m]	Ebenheitsabweichung [mm]	Mittleres 3D-Messrauschen [mm]
1,7	0,33 ± 0,04	0,06
2,0	0,37 ± 0,04	0,07
2,4	0,73 ± 0,13	0,15

4.2 Offshore-Messungen

Bei den Offshore-Messungen wurden verschiedene Messobjekte (siehe Abb. 8) auf dem Meeresgrund der Ostsee in einer Tiefe von ca. 12 m ausgelegt und anschließend durch das an einem ROV montierte (siehe Abb. 2 und Abb. 11) und vom Begleitschiff des ROV aus gesteuerte Sensorsystem vermessen. Das ROV war ein Work-Class-ROV vom Typ Comanche mit den Abmessungen von ca. 2,1 m x 1,3 m x 1,25 m und einem Gewicht von ca. 1.130 kg.

Dabei kamen beide Demonstratoren (UWS1 und UWS2) mit jeweils unterschiedlicher Geometrieauslegung (siehe Abschnitt 2, Abb. 2) zum Einsatz. Zunächst wurden die Systeme mittels am Meeresboden ausgelegten ArUco-Markerplatten gemäß des beschriebenen Verfahrens kalibriert. Dann erfolgten verschiedene Messfahrten mit unterschiedlichen vorgegebenen mittleren ROV-Geschwindigkeiten entsprechend einem vorab erstellten Messplan.

Analog zu den Messungen im Wasserbecken wurde die Länge des Kugelstabes in Abhängigkeit von der Messentfernung bei Wiederholungsmessungen sowie das 3D-Messrauschen auf den Kugeloberflächen und auf dem Ebenen-Normal bestimmt. Die Fehlerwerte der Kugelabstandsmessungen, die den abstandsabhängigen systematischen Fehler darstellen, sind in Tabelle 3 dokumentiert. Das mittlere Rauschen betrug 0,086 mm auf den Kugeloberflächen ($n=20$) und 0,080 mm (durchschnittlicher lokaler Wert) auf dem Ebenen-Normal ($n=10$).

Tab. 3: Längenmessfehler und 3D-Rauschen auf Kugeloberflächen bei Offshore-Messung (UWS2)

Messenfernung [m]	Längenmessfehler [mm]	Anzahl Wiederholungsmessungen
1,16 ± 0,02	2,04 ± 0,11	10
1,28 ± 0,01	2,46 ± 0,19	10
1,57 ± 0,03	4,10 ± 0,17	10

Im Vergleich zu den Messungen im Klarwasserbecken wurde ein erheblich höherer systematischer Messfehler bei der Längenmessung beobachtet (maximaler Fehler im Klarwasser: 0,05 %, im Meereswasser: 0,8%), der jedoch im Rahmen der akzeptablen Genauigkeit liegt und unter den gegebenen äußeren Bedingungen durchaus zu erwarten war. Es ist zu vermuten, dass eine Verbesserung der Kalibrierqualität durch erhöhtem Aufwand bei der Kalibrierung oder einer Nachkalibrierung erreicht werden kann.

Die Daten der Farbkamera wurden auf zwei Arten für die 3D-Rekonstruktion genutzt. Zusammen mit den IMU-Daten wurde ein simultanes Lokalisierungs- und Kartierungsverfahren (SLAM) angewendet, um mithilfe visueller Odometrie eine Karte des gesamten beobachteten Gebiets zu erstellen (Abb. 9 und Abb. 10). Hier wurde eine gute Vollständigkeit der Szenenaufnahme erreicht. Außerdem können beliebige Bildinhalte der Farbkamera auf den entsprechenden Teil mittels der Stereokamera generierten 3D-Modells abgebildet werden, um detaillierte 3D-Objektinformationen zu erhalten. Abbildung 11

verdeutlicht die erreichbare Detailgenauigkeit einer 3D-Einzelmessung mit dem UWS-System. Abbildung 12 zeigt einige Fotos vom Offshore-Einsatz.



Abb. 8: Geplante Anordnung des Testmessobjekte auf dem Meeresboden: Tongefäße, Ebenheitsnormale, Kugelstäbe, Zylinder (v.l.n.r.). Eine Bombenattrappe (fehlt im Bild) wurde noch neben den Zylinder platziert. Im Hintergrund ein Teil des „Rohrleitungssystems“



Abb. 9: Tatsächlich realisierte Anordnung auf dem Meeresboden (Bild erzeugt aus 3D-Rekonstruktion mittels visueller Odometrie): die Bombenattrappe wurde zwischen Zylinder und ein Ebenheitsnormal platziert



Abb. 10: Tatsächlich realisierte Anordnung des „Rohrleitungssystems“ auf dem Meeresboden (Bild erzeugt aus 3D-Rekonstruktion mittels visueller Odometrie): zur Überprüfung der Maßstabstreue wurden Kugelstäbe der Länge 2 m neben das Rohr gesetzt



Abb. 11: Rekonstruiertes Tongefäß mit Farbmapping auf das 3D-Modell (links) und 3D-Detailrekonstruktion des Reliefs in Oberflächendarstellung (rechts), erzeugt mittels Messkameradaten

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das neu entwickelte Sensorsystem UWS ermöglicht die mobile Erkennung dreidimensionaler Strukturen in Echtzeit mit hoher Detailgenauigkeit sowohl in klarem Wasser als auch in natürlichen Gewässern wie der Ostsee. Die absolute Genauigkeit metrischer Messungen beträgt je nach Wasserqualität zwischen 0,05 und 0,8%, d. h. bei Längen von beispielsweise 100mm beträgt der zu erwartende Messfehler zwischen 0,05 und 0,8mm. Es können bis zu 50 3D-Datensätze pro Sekunde generiert werden. Die hohe 3D-Messgenauigkeit wurde maßgeblich durch das besondere Augenmerk bei der Entwicklung des Kalibrierverfahrens für das Unterwasser-3D-Sensorsystem erzielt. Das Kalibrierverfahren basiert auf der geometrischen Modellierung der Sehstrahlen unter Berücksichtigung der Brechung an den Medienübergängen. Zusätzliche Verfeinerungsverfahren reduzieren darüber hinaus den systematischen Messfehler des Sensorsystems.

Das System führt eine Bewegungsschätzung und Korrektur störender Bewegungseffekte sowie eine Fusion der einzelnen Scans zu einem global konsistenten 3D-Modell durch. Bei mobilen Messungen konnte eine Verbesserung der Qualität der 3D-Punktwolke durch automatische Bewegungskompensation mittels visueller Odometrie erreicht werden. Bei Versuchen in klarem Wasser werden Messergebnisse mit einem sehr geringen systematischen Fehler erzielt. Diese Fehler liegen im gleichen Genauigkeitsbereich wie Messungen in Luft über einem vergleichbaren Messvolumen. Die Offshore-Messungen zeigten einen Anstieg des zufälligen Längenmessfehlers bei wiederholten Messungen im gleichen Messabstand im Vergleich zur Wasserbeckenmessung. Darüber hinaus gab es einen leichten Skalierungsfehler von unter einem Prozent, was jedoch immer noch eine hohe Genauigkeit darstellt. Die mobile Kartierung des gesamten abgefahrenen Gebietes z. B. des Meeresbodens auf Basis der visuellen Odometrie konnte erfolgreich demonstriert werden.

Mit dem erfolgreichen Abschluss des Projektes und der Realisierung der beiden Demonstratoren des Unterwasser-3D-Sensorsystems konnte die Eignung der verwendeten Messprinzipien für die genaue 3D-Oberflächenerfassung und 3D-Modellierung von Unterwasserstrukturen und die gleichzeitige Erfassung des Gewässerbodens im Sinne einer 3D-Kartierung gezeigt werden.

Bis zu einer Serienfertigung und damit möglichen kommerziellen Nutzung für eine breite Anwenderschaft sind jedoch weitere Entwicklungsschritte erforderlich, die das System handhabbarer und bedienerfreundlicher machen. Hier wäre als nächste Zielstellung eine Miniaturisierung des Systems auf kompaktere Ausmaße und etwa das halbe Gewicht zu nennen, um eine Anbindung an Inspection-Class-ROVs oder vergleichbare Trägersysteme zu ermöglichen.

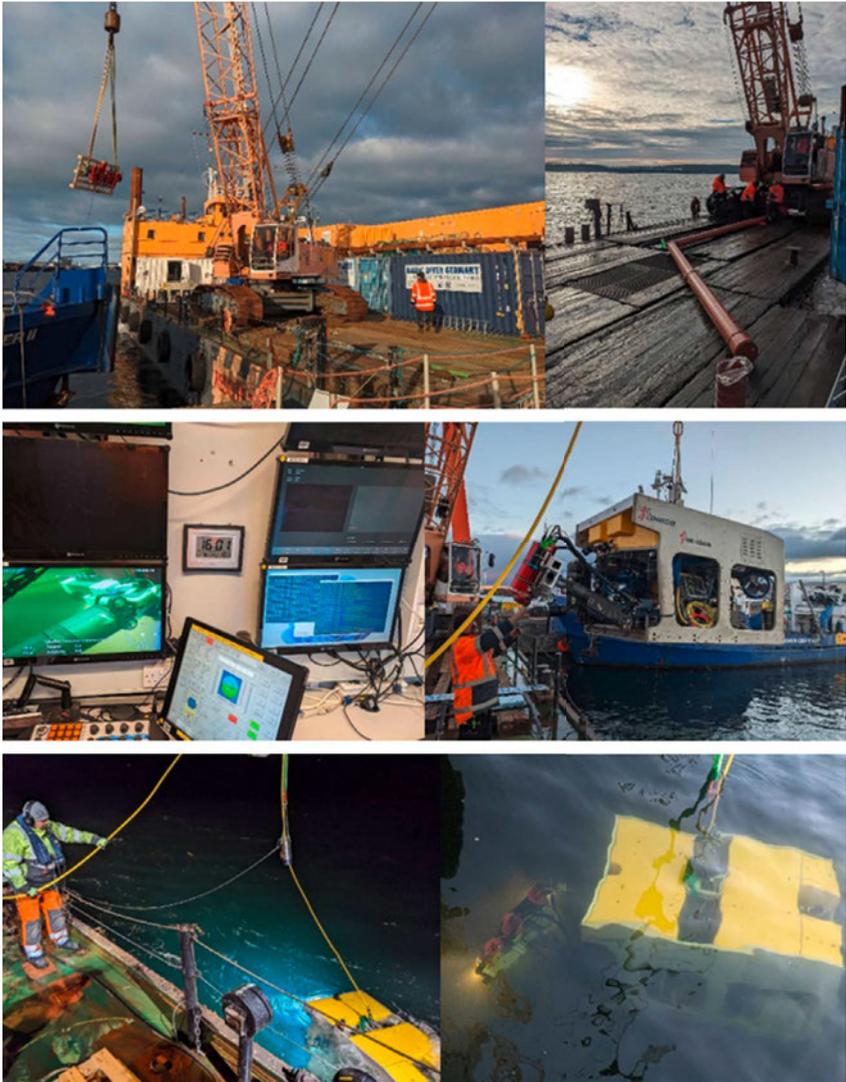


Abb. 12: Fotos vom Unterwassereinsatz

LITERATUR

- [1] McLeod, D.; Jacobson, J.; Hardy, M.; Embry, C. Autonomous inspection using an underwater 3D LiDAR. In *An Ocean in Common, Proceedings of the 2013 OCEANS, San Diego, CA, USA, 23–27 September 2013*; IEEE: New York, NY, USA, 2014.
- [2] Collin, C.A.; Archambault, P.; Long, B. Mapping the shallow water seabed habitat with the SHOALS, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 46 (10); 2008; pp. 2947–2955.
- [3] Georgopoulos, A.; Agrafiotis, P. Documentation of submerged monument using improved two media techniques. *IEEE 978-1-4673-2565-3/12/ 2012*; pp. 173-180
- [4] Balletti, C.; Beltrane, C.; Costa, E.; Guerr, F.; Vernier, P. Underwater photogrammetry and 3D reconstruction of marble cargos shipwrecks. *Int Arch Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol XL-5/W5, Underwater 3D Recording and Modeling, 16–17 April 2015, Piano di Sorrento, Italy; 2015*; pp. 7-13
- [5] Zhukovsky, M.O.; Kuznetsov, V.D., Olkhovsky, S.V.: Photogrammetric techniques for 3-D underwater record of the antique time ship from from Phangoria. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W2, 2013, XXIV International CIPA Symposium, 2 – 6 September 2013, Strasbourg, France, pp. 717-721*
- [6] Campbell, P. B. *An introduction to archaeology in underwater caves*. Highfield Press. 2018; pp. 5-26
- [7] Bythell, J.C.; Pan, P.; Lee, J. Three-dimensional morphometric measurements of reef corals using underwater photogrammetry techniques. *Coral Reefs* 2001, 20, 193–199.
- [8] Costa, C.; Loy, A.; Cataudella, S.; Davis, D.; Scardi, M. Extracting fish size using dual underwater cameras. *Aquac. Eng.* 2006, 35, 218–227.
- [9] Höhle, J., 1971. *Zur Theorie und Praxis der Unterwasser-Fotogrammetrie*, In: *Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Dissertationen, Bayerische Akademie der Wissenschaften München*
- [10] Moore, E.J., 1976. Underwater photogrammetry. *Photogrammetric Record* 8(48): 748-163
- [11] Bleier and Nüchter 2017. Low-cost laser scanning in air or water using self-calibrating structured light. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W3, 105-112*
- [12] Chi, C. 2019. *Underwater Real-Time 3D Acoustical Imaging – Theory, Algorithm, and System Design*. Springer, ISBN 978-981-13-3744-4
- [13] Bruno, F.; Bianco, G.; Muzzupappa, M.; Barone, S.; Rationale, A.V. Experimentation of structured light and stereo vision for underwater 3D reconstruction. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2011, 66, 508–518.

- [14] Bianco, G., Gallo, A., Bruno, F., Muzzupappa, M. (2013): A comparative analysis between active and passive techniques for underwater 3D reconstruction of close-range objects. *Sensors* 2013, 13, 11007-11031
- [15] Bräuer-Burchardt, C., Heinze, M., Schmidt, I., Kühmstedt, P., Notni, G.: Compact Handheld Fringe Projection Based Underwater 3D-Scanner, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-5/W5, 33-39, 2015
- [16] Heist, S.; Dietrich, P.; Landmann, M.; Kühmstedt, P.; Notni, G. High-speed 3D shape measurement by GOBO projection of aperiodic sinusoidal fringes: A performance analysis. In *Proceedings of the SPIE Dimensional Optical Metrology and Inspection for Practical Applications VII*, 106670A, 2018; Volume 10667. <https://doi.org/10.1117/12.2304760>.
- [17] Duda, A.; Schwendner, J.; Gaudig, C. SRSL: Monocular self-referenced line structured light. In *Proceedings of the 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015; pp. 717–722.
- [18] Schütz, M., 2016: Potree: Rendering large point clouds in web browsers. Dissertation, Technische Universität Wien.
- [19] Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Harley, I., 2006. Close range photogrammetry. Wiley Whittles Publishing
- [20] Sedlazeck, A., Koch, R., 2011. Perspective and non-perspective camera models in underwater imaging - overview and error analysis. In: *Theoretical Foundations of Computer Vision*, vol. 7474 of Springer LNCS, 212–242
- [21] Telem, G., Filin, S., 2010. Photogrammetric modeling of underwater environments, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65(5), 433
- [22] Maas, H.G. On the accuracy potential in underwater/multimedia photogrammetry. *Sensors* 2015, 15, 1814–1852.
- [23] Shortis, M. Camera calibration techniques for accurate measurement underwater. In *3D Recording and Interpretation for Maritime Archaeology; Coastal Research Library; McCarthy, J., Benjamin, J., Winton, T., van Duivenvoorde, W., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2019; Volume 31*.
- [24] Bräuer-Burchardt, C., Munkelt, C., Heinze, M., Gebhart, I., Kühmstedt, P., Notni, G.: Underwater 3D Measurements with Advanced Camera Modelling. *PFG* 90, 55–67 (2022). <https://doi.org/10.1007/s41064-022-00195-y>
- [25] Bräuer-Burchardt, C.; Munkelt, C.; Heinze, M.; Heist, S.; Kühmstedt, P.; Notni, G.: Kalibrierung eines auf strukturierter Beleuchtung basierenden Unterwasser-Stereo-Scanners für hochgenaue 3D-Messungen. In: *Proceedings Oldenburger 3D-Tage 2022*
- [26] Bräuer-Burchardt, C.; Munkelt, C.; Bleier, M.; Heinze, M.; Gebhart, I.; Kühmstedt, P.; Notni, G. A New Sensor System for Accurate 3D Surface Measurements and Modeling of Underwater Objects. *Appl. Sci.* 2022, 12, 4139. <https://doi.org/10.3390/app120941>

- [27] Garrido-Jurado, S.; Muñoz-Salinas, R.; Madrid-Cuevas, F.J.; Marín-Jiménez, M.J. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition* 2014, 47, 2280–2292. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.01.005>.
- [28] Kruck, E. BINGO: Ein Bündelprogramm zur Simultanausgleichung für Ingenieur-anwendungen—Möglichkeiten und praktische Ergebnisse. In *Proceedings of the ISPRS, Rio de Janeiro, Brazil, 1984; International Archive for Photogrammetry and Remote Sensing*
- [29] Bleier, M., Munkelt, C., Heinze, M., Bräuer-Burchardt, C., Lauterbach, H., van der Lucht, Nüchter, A., Marx, S., Fromme, D., Dettmer, C. UWSensor: Ein optisches Unterwasser-3D-Scannersystem für mobile Kartierung. *Proc. Jahrestagung DGPF*
- [30] VDI/VDE, 2008. VDI/VDE 2634. Optical 3D-measuring systems. VDI/VDE guidelines, Parts 1-3

ROBUST

INTEGRIERTES BESCHICHTUNGS- UND REINIGUNGSKONZEPT ZUR
BEWUCHSKONTROLLE AN OFFSHORE-STRUKTUREN

AUTOR

TIM HEUSINGER VON WALDEGGE	FRAUNHOFER IFAM; VERBUNDKOORDINATOR
DR. DOROTHEA STÜBING	FRAUNHOFER IFAM
BERND DAEHNE	DR. BRILL + PARTNER GMBH INSTITUT FÜR ANTIFOULING UND BOKORROSION
LUKAS KUHN	DR. BRILL + PARTNER GMBH INSTITUT FÜR ANTIFOULING UND BOKORROSION
DR. THORSTEN FELDER	MOMENTIVE PERFORMANCE MATERIALS GMBH
DR. PHILIP KENSBOCK	MOMENTIVE PERFORMANCE MATERIALS GMBH

1. EINLEITUNG UND MOTIVATION

Die harsche, marine Anwendungsumgebung bürdet Material und Technik zahlreiche Anforderungen auf, die es zu erfüllen gilt, um längerfristig bestehen zu können. Dennoch lohnt sich dieser Aufwand, denn die maritime Industrie ist aus mehreren Gründen von großer Wichtigkeit für unseren Alltag. 90% des globalen Welthandels leistet die Seeschifffahrt und auch für die Energiewende sind Küsten- und Offshore-Gebiete von ausschlaggebender Bedeutung, immerhin produzierten Offshore-Windparks im Jahr 2022 25,12 Gigawattstunden Strom¹. Hinzu kommen Zukunftstechnologien, wie schwimmende Solarparks, Gezeiten- und Wellenkraftwerke. Beschichtungen sind von zentralem Wert für den langfristigen Schutz von maritimen Konstruktionen und den Erhalt der technischen Funktionalität.

Im Unterwasserbereich stellt Biofouling einen wichtigen Einflussfaktor dar, denn es führt zu veränderten Strömungsverhältnissen, erhöhten Lasten und erschwert Inspektionsaufgaben². Das Gesamtziel des Projekts »ROBUST« bestand darin, ein integriertes Konzept zur Kontrolle des Bewuchses an Offshore-Stahlkonstruktionen zu entwickeln. Es zielte darauf ab, Beschichtungen zu entwickeln, die sowohl mechanisch stabil sind, um eine mehrmalige, mechanische Reinigung, wie es in der Praxis üblich ist, unbeschadet überstehen zu können als auch die Ansiedlung von Bewuchs grundsätzlich zu verringern.

Die Herausforderung bestand darin, Beschichtungen zu formulieren, die die Eigenschaften von abrasionsstabilen und bewuchsvermeidenden Beschichtungen kombinierten, denn bisherige Beschichtungen leisten entweder das eine oder das andere.

Auf der einen Seite sollte das Beschichtungssystem daher eine hohe Abriebfestigkeit aufweisen. Ebenso war eine ausgezeichnete Haftung auf Grundierungs- oder Korrosions-

schutzanstrichen von großer Bedeutung. Auch die Applikation musste einfach, schnell und flexibel erfolgen können. Dabei war es entscheidend, die optimalen Bedingungen für die Aushärtung zu ermitteln, um die gewünschte Schichtqualität zu erzielen. Die Schichtdicke der Beschichtung wurde ebenso in Betracht gezogen, um den Anforderungen zur Langzeitstabilität gerecht zu werden. Durch die Bewuchsschutzeigenschaften sollte das Anhaften von Organismen reduziert werden. Die Entwicklung konzentrierte sich auf ungiftige, nicht-biozide Systeme, um den gesetzlichen Vorgaben zu entsprechen und Nachhaltigkeitsaspekte zu berücksichtigen. Die Beschichtung sollte in der Lage sein, wiederholt gereinigt zu werden, ohne ihre bewuchsmindernden Effekte zu verlieren.

2. METHODIK: PRÜFEN UND TESTEN

Um Beschichtungen auf ihre Standzeit von 20-25 Jahren innerhalb einer dreijährigen Projektlaufzeit zu testen, wurde ein dreiteiliges Versuchsprogramm erstellt. Zunächst kamen Standardtests zum Einsatz, die jeweils über ein Jahr liefen und vor allem in den ersten beiden Jahren eine hohe Anzahl von Eigenentwicklungen prüften. Hierbei wurde am Ende der Saison eine Einmalreinigung mit 220 bar Wasserhochdruck durchgeführt. Diese Probenkategorie mit jeweils 10 x 10 cm großen Probeflächen stellte das Instrument dar, mit dem primär die Bewuchsschutzeigenschaften evaluiert werden sollten.

Ein als Verschleißtests bezeichnetes Versuchsszenario setzte die dafür konzipierten Proben, in der Größe 20 x 20 m, mehreren Reinigungsvorgängen pro Saison aus, um den Verschleiß zu simulieren, dem eine Beschichtung an einer Windenergieanlage während ihrer realen Standzeit von 20-25 Jahren ausgesetzt ist (vgl. Abb. 1). Aufgrund des erkannten Verschleißes in den ersten beiden Saisons wurden diese Systeme jedoch jährlich durch neue, optimierte Systeme ersetzt. Die Verschleißtests stellten das wichtigste Instrument dar, um die Abrasionsstabilität unter simulierten Anwendungsbedingungen zu prüfen. Die mechanische Reinigung wurde nach dem Stand der Technik mittels rotierender Bürsten oder mit Hochdruckwasserstrahl durchgeführt (vgl. Abb. 2 und 3). Für die Bürstenreinigung wurden verschiedene Bürstenmaterialien und Härtegrade nach einem eigens entwickelten Versuchsschema eingesetzt. So konnten die Arbeiten auch zwischen den Feldstandorten Norderney und Helgoland standardisiert werden. Die Reinigung erfolgte zunächst mit dem geringsten Härtegrad und dann je nach Reinigungserfolg mit aufsteigender Härte. Im dritten Jahr der Feldtest wurde für die Reinigung nur noch der Hochdruckwasserstrahl eingesetzt, da die rotierenden Bürsten u.a. durch die Ablösung von kalkhaltigem Fouling starke Beschädigungen auf den Beschichtungen erzeugten, auch auf den kommerziellen Referenzsystemen.



Abb. 1: Experimentelle Beschichtungssysteme, mit kommerziellen Referenzbeschichtungen auf 20 x 20 cm PVC-Substraten zu Beginn der Feldprüfungen 2021. Hierbei handelt es sich um Verschleißproben, die im Laufe des Auslagerungsjahres eine mehrfache Reinigung durchlaufen. © Fraunhofer IFAM



Abb. 2: Reinigungsutensilien im Projekt »ROBUST«: Oben sind die Aufsätze für den Hochdruckwasserstrahl zu sehen, die sich durch einen anderen Strahlwinkel auszeichnen. Die untere Fotofolge zeigt die schwamm- bzw. bürstenbasierten Reinigungsinstrumente, beginnend mit dem Schwamm (weiche und harter Seite), Bürstenköpfe weich (weiß), mittelhart (blau) und hart (rot). Bei der ersten Inspektion der Verschleißproben kamen nur der Schwamm und die weiche Bürste zum Einsatz. © Brill + Partner GmbH

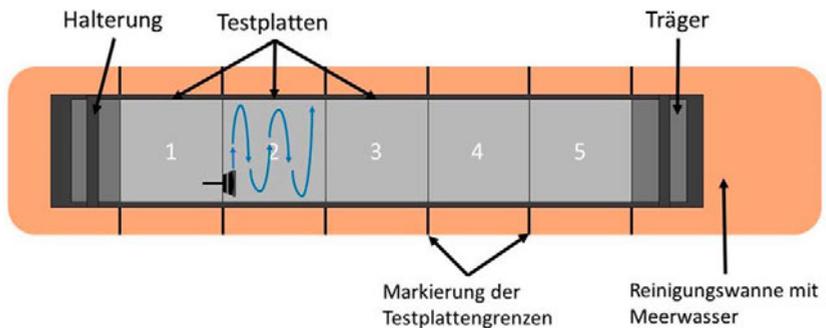


Abb. 3: Reinigungsschema für die Bürsten- und Hochdruckwasserstrahlreinigung. © Brill + Partner GmbH

Als dritte Testvariante wurde bereits zu Beginn der Versuchskampagne ein Langzeittest gestartet, der über rund 3,5 Jahre lief. Dieser konzentrierte sich darauf, die Reinigungsfähigkeit der Testbeschichtungen nach einem längeren Intervall zu prüfen, das dem tatsächlichen Zeitraum zwischen zwei Reinigungsvorgängen an einer WEA nahekommt. Hierbei wurde lediglich im März 2023 eine einmalige Reinigung mittels 220 bar Wasserhochdruck durchgeführt. Diese Proben sollten vor allem Erkenntnisse zu der Sukzession des Foulings liefern und Hinweise auf Self-Cleaning Eigenschaften der experimentellen Systeme geben.

Während des Entwicklungszeitraums wurden umfassende Laborprüfverfahren eingesetzt, darunter Linearabrationstests und die Simulationen von Reinigungsprozessen u. a. an neu entwickelten Prüfständen (vgl. Abb. 4). Die Oberflächenanalyse erfolgte mittels spezifischer Testmethoden, wie der Kontaktwinkelmessung zur Beurteilung der Oberflächeneigenschaften sowie dem Hydrolysetest unter Kurzauslagerung, um die Beständigkeit der Beschichtung gegenüber Umwelteinflüssen zu überprüfen. Zusätzlich wurde auch die Möglichkeit der Überbeschichtung bestehender Korrosionsschutzoberflächen untersucht. Hier lag der Fokus auf der Haftung der neuen Beschichtung auf den bereits vorhandenen Oberflächen. Die Entwicklung beinhaltete zudem Ansätze zur Reparatur der Beschichtung, um sicherzustellen, dass die Integrität der Beschichtung über die Zeit gewährleistet ist.

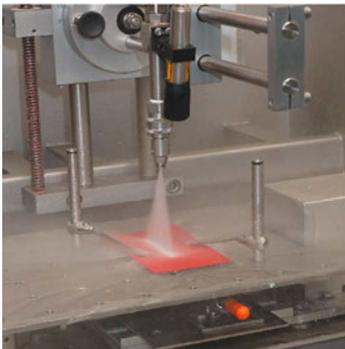


Abb. 4: Hochdruckwasserstrahl- (links) und die Eigenentwicklung eines Bürsten- Laborprüfstandes (rechts) zur Vorqualifizierung der entwickelten Systeme. Die Vorselektion war notwendig, um u.a. die begrenzte Anzahl von Versuchsplätzen im Feld am effektivsten zu nutzen. © Momentive Performance Materials GmbH

Labortests allein können die hochgradig anspruchsvolle Anwendungsumgebung nicht vollumfänglich abbilden. Biofouling ist ein komplexes Phänomen, da jede Spezies eigene Adhäsionsstrategien nutzt. Anwendungsnahe Feldtests sind daher ein unerlässlicher Baustein zur Qualifizierung der neu entwickelten Materialien und Beschichtungen. Simulierte Feldversuche dienen dem Screening von Testbeschichtungen, die für den Offshore-Einsatz an ausgewählten Standorten mit hohem Bewuchsdruck (auf der Nordhalbkugel besteht dieser von März bis Oktober) entwickelt wurden. Dieses Testdesign ermöglichte die optimale Nutzung der Projektdauer für die Formulierung und Optimierung von Testbeschichtungen. Die prospektiven und leistungsstärksten Formulierungen wurden nach ihrer Vorqualifizierung in Laborprüfungen in Feldtests exponiert. Das Unternehmen

Dr. Brill + Partner führte simulierte Feldtests auf Norderney durch. Eine Testplatte jedes Beschichtungssystems wurde am Schwimmponton im Norderneyer Hafen angebracht. Weitere Proben wurden in der tidebeeinflussten Spritzzone an der Brill-Strandstation ausgesetzt. Ein weiteres Gestell mit Replikaten wurde dauerhaft unter dem Niedrigwasserspiegel platziert. Vergleichstests wurden vom Fraunhofer IFAM auf dem Helgoland Prüfstand für statische Bewuchstests durchgeführt, um die Wirksamkeit der Testbeschichtungen an einem anderen Offshore-Standort zu validieren.

Die Wirksamkeit und Haltbarkeit der Testsysteme wurden während der Bewuchsperiode von März/April bis September/Okttober monatlich gemäß ASTM 6990-20 bewertet. Dabei wurde der Bedeckungsgrad der Proben mittels standardisierter, softwarebasierter Verfahren ermittelt. Auch taxonomische Bestimmungen und die Erfassung dominierender Taxa wurden durchgeführt. Zusätzlich wurden Bewuchsgewichts- und Haftungsmessungen von Seepocken gemäß ASTM 5618-94 durchgeführt. Als Referenzmaterialien diente u.a. ein kommerziell erhältliches, zertifiziertes Hochsee Topcoat.

Zusätzlich zu den schwimmenden Prüfständen wurde in einem abschließenden Demonstrationsversuch im Helgoländer Unterwassertestfeld "MarGate" ein 300kg schwerer, kubusförmiger Lander in einer Tiefe von ungefähr 9 Metern auf dem Meeresboden der Nordsee platziert. Die Neuentwicklung dieses Landers ermöglichte die gleichzeitige Prüfung von bis zu 64 Beschichtungs- und Materialproben mit einer Größe von 20x40 cm in größeren Wassertiefen. Das "MarGate" Unterwasser-Testfeld verfügte über eine eigene Sensordatenerfassung, um wichtige umweltbezogene Parameter wie Temperatur, Salzgehalt und Strömungsbedingungen in die ganzheitliche Auswertung der Proben einzubeziehen. Die erzielten Ergebnisse waren daher von großer Praxisrelevanz, insbesondere für die Konstruktion von Pipelines, Umspannplattformen und Offshore-Gründungsstrukturen. Die Ergebnisse wurden in standardisierten Protokollen festgehalten. Reinigungen, die im Rahmen der Inspektionen durchgeführt wurden, fanden ebenfalls unter Wasser statt. Die Auswertungen vor und nach den Reinigungen ermöglichten die Erfassung der Wirksamkeit, zur mechanischen Stabilität, Haftung und Neubesiedlung durch marinen Bewuchs.

3. METHODIK: BESCHICHTUNGSENTWICKLUNG

Beschichtungsformulierungen erlauben den mannigfaltigen Einsatz von Füllstoffen, Bindemittel und funktionalen Additiven usw. Dementsprechend sind während des Projektes unterschiedliche Entwicklungsrouten verfolgt worden. Die daraus resultierenden Systeme unterscheiden sich dabei nicht allein in ihrer Rezeptur, sondern auch in der Art des Härtungsmechanismus. So wurden im Laufe der Projektlaufzeit allein in den Feldtests 441 Proben getestet. Ein Vielfaches davon unterlag der Vorqualifizierung in den Laborprüfungen. Neben der reinen Formulierungsarbeit hat die Momentive Performance Materials GmbH vorwiegend an neuen Rohstoffen und Performance-Additiven gearbeitet, die später der Erreichung der Projektziele dienen sollten.

Im Rahmen des Projekts erfolgte die Entwicklung einer Silikonlackgrundmatrix mit Eigenschaften, die Bewuchs entweder abstoßen oder dessen Wachstum verringern. Dabei wurde sichergestellt, dass keinerlei Biozide oder biozidwirksame Komponenten verwendet wurden. Zudem lag ein Augenmerk darauf, dass der Effekt der Bewuchsreduzierung nicht auf auswaschbaren oder herauslösbaren Bestandteilen der Lackmatrix beruht. Dem Bewuchsschutz liegt im vorliegenden Projekt die Hypothese zugrunde, dass hydrophile und hydrophobe Domänen auf der Lackoberfläche die entropischen und enthalpischen Triebkräfte für die Adsorption der Meeresorganismen verringern (vgl. Abb. 5).³

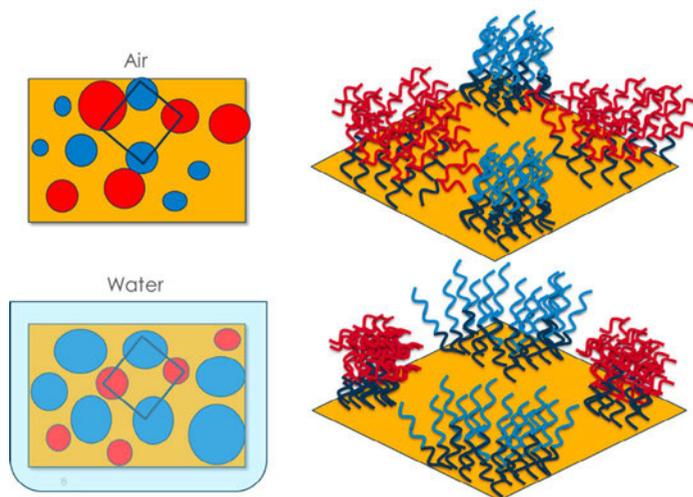


Abb. 5: Schematische Darstellung einer aus hydrophilen und hydrophoben Domänen bestehenden Oberfläche, zur Entfaltung eines Foulingrelease Mechanismus. © Momentive Performance Materials GmbH

Bereits in vorangegangenen Projekten entwickelte Beschichtungssysteme wiesen gute Bewuchsschutz- und Reinigungseigenschaften auf. Ziel war es, diese Eigenschaften weiter zu verbessern, um den Anforderungen für Offshore-Strukturen gerecht zu werden. Hierbei wurden geeignete Lackkomponenten wie Oberflächenmodifiziertes TiO_2 , SiO_2 , Polymerharze und hydrophile/hydrophobe Zusätze verwendet. Des Weiteren erfolgte die Transformation des Silikon-Systems mit zuvor eingeschränkter mechanischer Festigkeit hin zu einer widerstandsfähigen Beschichtung – unter Beibehaltung der Eigenschaften hinsichtlich der Bewuchskontrolle. Für diesen Zweck wurden u.a. unterschiedliche Konzepte elastomerer Bindemittel auf Basis von Polydimethylsiloxan (PDMS) entwickelt. Diese wurden kombiniert mit härteren Bindemitteltypen wie Polyurethanen (PU), Epoxiden (EP) und Polysilazanen, um Hybridmaterialien zu generieren. Durch diese Kombination sollten die mechanischen Eigenschaften der Beschichtung verbessert werden. Ebenfalls wurden neue hydrophile und hydrophobe Silikon-Additive zur Optimierung der Bewuchsablösung und der Selbstreinigung entwickelt. Diese wurden beispielsweise in thermische oder UV-härtbare Hartbeschichtung integriert. Weiterhin erfolgte die Einbringung von verstärkenden Füllstoffen wie pyrogener Kieselsäure, Polymerfasern, Quarz, Korund und Siliziumcarbid. Diese härteverleihenden Materialien wurden ebenso

in Lackformulierungen getestet, um die Abriebfestigkeit und mechanische Stabilität der Beschichtungen zu erhöhen.

Die entwickelten Systeme unterlagen einem internen Vergleich, sind jedoch, wie bereits erwähnt, zusätzlich auch anhand kommerzieller Referenzbeschichtungen vergleichend bewertet worden.

Durch die Kombination dieser verschiedenen Ansätze wurde eine breite Palette von Beschichtungsmaterialien entwickelt und getestet, um die gewünschten Eigenschaften in Bezug auf Elastizität, Abriebfestigkeit, Fouling-Release-Wirkung und mechanische Stabilität zu erreichen.

4. ERGEBNISSE

Die Vielzahl der durchgeführten Labor- und Feldversuche zusammenzufassen kann in diesem Format nur auf exemplarischem Wege gelingen. Als Beispiel für eine essentielle Labormethode zur Charakterisierung der entwickelten Beschichtungen diente die Messung der Shore-A-Härte. Sie lieferte eine kompakte Zusammenfassung der mechanischen Stabilität eines Beschichtungssystems. Die Werte vermittelten Einblicke in die Widerstandsfähigkeit und Elastizität der Beschichtungs Oberfläche gegenüber mechanischen Belastungen wie Druck, Abrieb und Verformung. Eine höhere Shore-A-Härte deutete auf eine härtere und weniger verformbare Oberfläche hin, die widerstandsfähiger gegenüber äußeren Einwirkungen war. Niedrigere Werte hingegen wiesen auf eine weichere und elastischere Oberfläche hin, die bei Belastung leichter nachgab. Die Shore-A-Härte war ein bedeutsamer Indikator für die Eignung eines Beschichtungssystems für spezifische Anwendungsbereiche sowie die potenzielle Haltbarkeit unter mechanischer Beanspruchung. In Abb. 6 ist dargestellt, wie sich dieser Parameter über die Projektlaufzeit für drei exemplarisch dargestellte Entwicklungspfade, mit jeweils Unterschieden in der Formulierungszusammensetzung (1. PDMS, 2. EP-PDMS und 3. PU-PDMS) durch Optimierungsarbeiten in der Formulierung veränderte. Die Intention bestand darin, die Beschichtungen aufgrund der aufgetretenen Reinigungsdefekte mechanisch stabiler zu machen. Diese Lackcharakterisierung dient als Beispiel für die mannigfaltig durchgeführten Analysen und deren Wichtigkeit für einen zielgerichteten Entwicklungsprozess.

Die gewonnenen Erkenntnisse der simulierten Feldtests auf Norderney betonen den Erfolg von Beschichtungen sowohl in Standardtests – wo lediglich eine Reinigung nach einer Saison bzw. drei Saisons erfolgte – als auch in Langzeittests. In diesen Tests schnitten viele Beschichtungen positiv ab. Hingegen wirkte die Abrasion in den Verschleißtests, in denen mehrfache Reinigungen innerhalb einer Saison durchgeführt wurden, als klarer Selektionsfaktor für die untersuchten Systeme. Unter den Bedingungen des Norderneyer Hafens, wo der Bewuchs weniger aus hartschaligen Seepocken bestand, ermöglichten schonendere Reinigungen eine verringerte Beschädigungsrate.

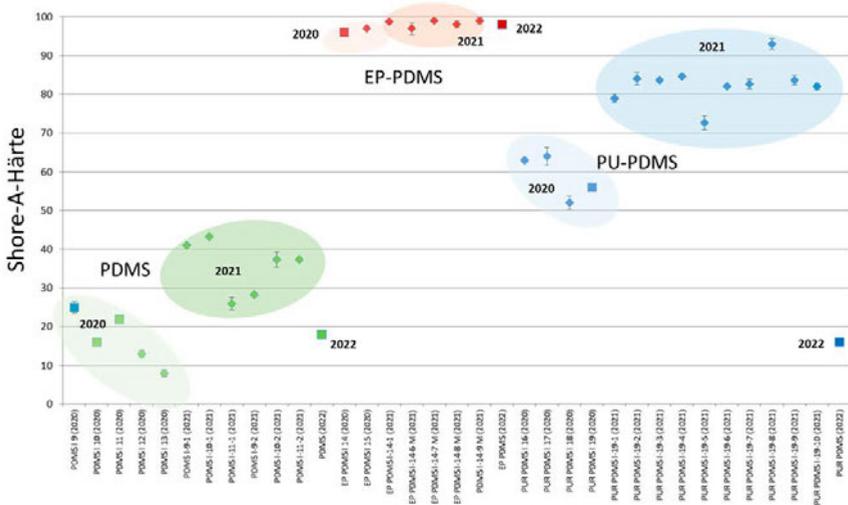


Abb. 6: Vergleich der Shore-A-Härte für PDMS-, EP-PDMS und PU-PDMS-Systeme des IFAM aus den Entwicklungsjahren 2020, 2021 im Jahr 2022. © Fraunhofer IFAM

In Kontrast dazu war an der Strandstation mit anspruchsvolleren Bedingungen – inklusive regelmäßigen tidebedingten Trockenfallzeiten – eine erhebliche Zunahme an hartschaligem Bewuchs zu verzeichnen. In dieser Umgebung waren Reinigungen oft unzureichend durchführbar oder führten zu Beschädigungen. Die zusätzlich abrasive Wirkung der Kalkschalen verschärfte diese Herausforderung. Trotzdem erwiesen sich einige Beschichtungen als widerstandsfähig genug und konnten den Bewuchs wirkungsvoll vermindern.

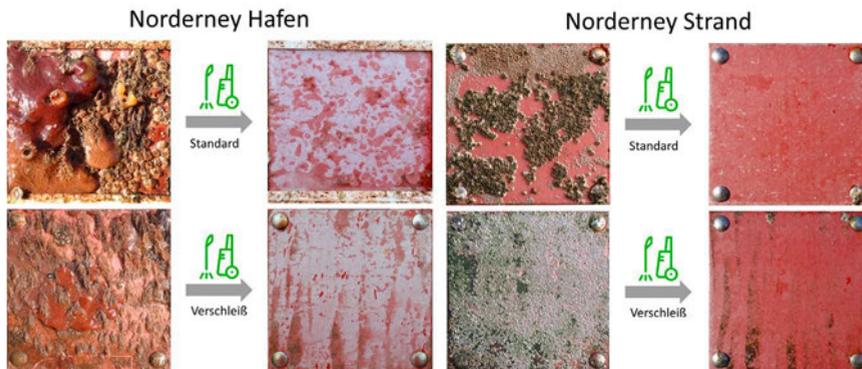


Abb. 7: Überwiegend weicher Bewuchs mit Aszidien und Moostierchen im Norderneyer Hafen (links) und hartschaliger Seepockenbewuchs am Strand von Norderney am Beispiel von Testsystem MOM 749. In allen Fällen war eine Reinigung möglich mit nur geringen Beschädigungen der Oberfläche nach der dritten Reinigung der Verschleißfreie. © Dr. Brill + Partner GmbH

Die erlangten Erkenntnisse von Helgoland lieferten vor allem im Hinblick auf die Langzeitproben vielversprechende Resultate. Zwei der fünf untersuchten Systeme wiesen wiederkehrende Selbstreinigungseigenschaften auf, die hypothetisch mit der Menge des an-

haftenden Biofouling korrelieren. Die ersten beiden Generationen zeigten eine deutliche Verbesserung in Bezug auf Bewuchsschutz- und Reinigungseigenschaften im Vergleich zur Referenz. Die dritte Generation vermochte den Bewuchsschutz im Vergleich zur kommerziellen Referenz zu erhöhen, ohne jedoch eine signifikante Weiterentwicklung gegenüber der zweiten Generation zu erzielen. Bemerkenswert war die inhärente Abrasivität der Bürstenreinigung, die durch Bruchstücke hartschaliger Organismen wie Seepocken verstärkt wurde. Nicht nur für die experimentellen Beschichtungen, sondern auch für die etablierte kommerzielle Referenz bedeutete dies ein erhöhtes Schadensrisiko. Ein Wendepunkt trat in diesem Zusammenhang im dritten Jahr auf, als ein Wechsel der Reinigungsmethodik (Bürste zu Hochdruckwasserstrahl) stattfand. Dies führte zu einer deutlich reduzierten Anzahl von Beschichtungsschäden, was eine wesentliche Möglichkeit zur Optimierung aufzeigte. An dieser Stelle ist hervorzuheben, dass die statischen Bewuchsbedingungen als Extremszenario betrachtet werden können. Angesichts dieser Schlussfolgerungen manifestierten die Erkenntnisse von Helgoland nicht nur die Innovationsdynamik im Bereich der Beschichtungsentwicklung, sondern betonten auch die Praktikabilität und den Stellenwert adaptiver Reinigungsmodalitäten.

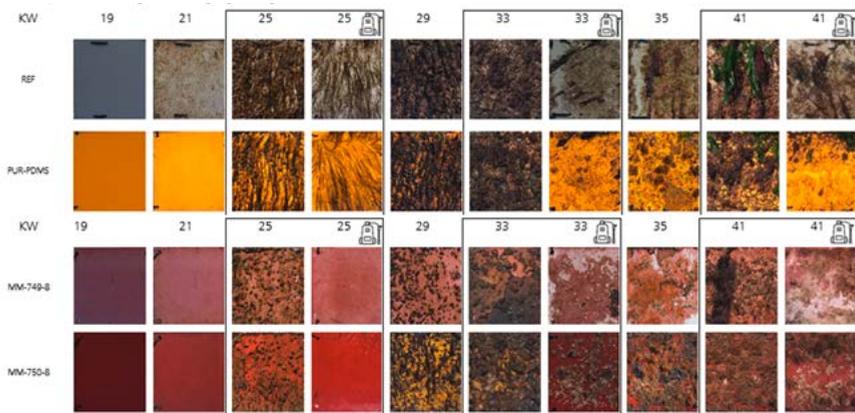


Abb. 8: Bewuchsszenario für drei ausgewählte, Helgoländer Verschleißproben im Jahr 2022 (3. Generation der Beschichtungsentwicklung) in Abhängigkeit von dem zeitlichen Verlauf, maskiert durch Kalenderwochen. Die eingerahmten Kästen zeigen die Probe vor und nach der Reinigung mit Hochdruckwasserstrahl. In der obere Fotoreihe ist die kommerzielle Referenz zu sehen, die deutlich mehr Bewuchs akkumuliert und einen geringeren Reinigungserfolg aufweist. © Fraunhofer IFAM

In einem weiteren Ansatz wurden neue Silikon-Additive und Lackkomponenten entwickelt und in bereits abrasionsbeständige thermische und UV-härtbare Hartbeschichtungen integriert. Durch die Additivierung und Weiterentwicklung der Beschichtungsformulierungen wurde ein guter Kompromiss zwischen mechanischer Beständigkeit, Untergrundhaftung und einer bewuchsablösenden Wirkung erzielt (Abb. 8).

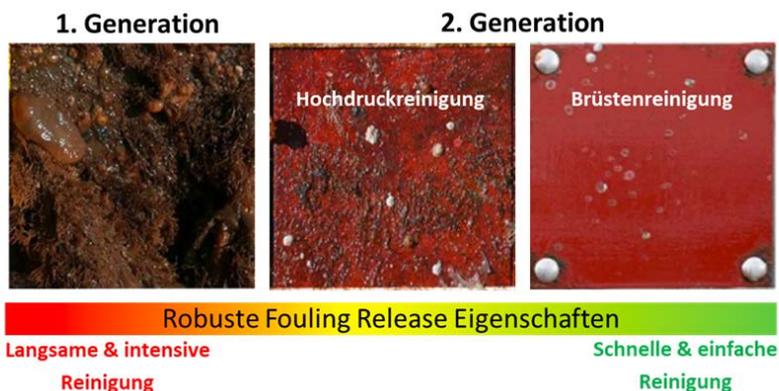


Abb. 9: Exemplarische Darstellung der Weiterentwicklung der Additive und deren Wirkung in einer UV-härtbaren Hartbeschichtung. © Momentive Performance Materials GmbH

Mit den fortschreitenden Generationen der Additiv- und der Formulierungsentwicklung in der Projektzeit wurde ersichtlich, dass die Reinigungsfähigkeit bei bleibender abrasiver Beständigkeit zunehmend verbessert werden konnte. Während die Reinigung der 1. Generation einer UV-härtbaren Beschichtung noch eine intensive mechanische Einwirkung auf den Oberflächenbewuchs erforderte, konnte eine Ablösung in der 2. Generation schon mit einer Hochdruckreinigung oder mit einer weichen Bürste realisiert werden.

Das vorliegende Untersuchungsergebnis konstatiert, dass ein umweltfreundlicher Bewuchsschutz ohne den Einsatz von Bioziden realisierbar ist, auch unter statischen Bedingungen. Weniger Bewuchs und potenzielle Self-Cleaning Eigenschaften der Systeme gehen einher mit einem reduzierten Reinigungsaufwand, wodurch Effizienzsteigerungen erzielt werden konnten. Deutlich wurde, dass der abrasive Abrieb durch kalkifizierende Organismen, insbesondere in Kombination mit Bürstenreinigungen, eine herausfordernde Problemstellung für alle getesteten Beschichtungssysteme darstellt. Hierbei zeigte sich, dass der Einsatz eines Hochdruckwasserstrahls möglicherweise Schäden minimieren kann, wobei eine präzise Ausführung zentral ist. Es wird ferner hervorgehoben, dass die experimentellen Beschichtungen überwiegend eine verbesserte Bewuchsschutzleistung im Vergleich zu etablierten kommerziellen Korrosionsschutzbeschichtungen, die bisher bei Offshore-Anlagen im Einsatz sind, aufweisen. Dies wiederum kann zu einer erheblichen Kostenreduktion durch gesteigerte Effizienz beitragen und somit einen wegweisenden Schritt für die Unterwasser-Inspektionen darstellen.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das Projekt war Grundlage für umfangreiche Verwertungsmaßnahmen. Zum jetzigen Zeitpunkt gibt es bereits zwei Patentanmeldungen. Eine betrifft neu entwickelte Additive und die andere bezieht sich auf UV-härtende Beschichtungen. Hinzu kamen Veröffentlichungen zu verschiedenen Themen und Anlässen.

In Bezug auf die Entwicklungsarbeiten wurden Fouling-release (s.u.) Additive über einen Zeitraum von 2020 bis 2022 untersucht, um deren Marktfähigkeit zu ermitteln. Positive Testergebnisse in angrenzenden Geschäftsfeldern (Antigraffiti-Polyurethan-Anwendungen und schmutzabweisende Beschichtungen) haben zur Erweiterung der Tests geführt.

Die Abschlussbewertung des Projekts im Hinblick auf die festgelegten Zielvorgaben verdeutlicht sowohl Erfolge als auch Bereiche mit Raum für Weiterentwicklung. Die ursprünglichen Ziele, darunter die Fähigkeit zur wiederholenden Reinigung bis zu 10-mal ohne Oberflächenschädigung sowie eine 50%ige Zeitreduktion bei Reinigungsmaßnahmen im Vergleich zu gängigen Marktstandards, wurden intensiv verfolgt. Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass die wiederholbare Reinigungsfähigkeit in Laborumgebungen acht Wiederholungen ermöglicht. Im Feldtest konnten aufgrund der Saisonalität in den gemäßigten Breiten immerhin vier Wiederholungen innerhalb eines Jahres erreicht werden. Dies unterstreicht das erhebliche Potenzial für eine verbesserte Performance in realen Anwendungsbedingungen. Zudem führte der Feldtest zu einer Zeitreduktion von über 50%, was die Effizienzsteigerung bei Reinigungsverfahren bestätigt. Besonders erfreulich ist, dass trotz Inflation die Vertriebsgemeinkosten der Fouling-release-Beschichtungssysteme im geplanten Bereich von 20-50 EUR/kg verbleiben. Dies spiegelte die wirtschaftliche Stabilität des Projektes wider.

PROJEKTFÖRDERUNG

Das Projekt »ROBUST« (FKZ: 03SX490) wurde durch das Ministerium für Wirtschaft und Klimaschutz der Bundesrepublik Deutschland (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Der Dank des Projektkonsortiums gilt zudem den Mitarbeitenden des Projektträgers Jülich (PtJ) für die gute administrative und fachliche Unterstützung des Vorhabens.

LITERATUR

- [1] BMWK. (28. Februar, 2023). Bruttostromerzeugung aus Offshore-Windenergieanlagen in Deutschland in den Jahren 2009 bis 2022 (in Gigawattstunden) [Graph]. In Statista. Zugriff am 31. August 2023, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/270887/umfrage/stromerzeugung-aus-offwea-in-deutschland/>
- [2] Schoefs, F., Tran, T.-B. (2022). Reliability Updating of Offshore Structures Subjected to Marine Growth. *Energies* 2022, 15, 414. <https://doi.org/10.3390/en15020414>
- [3] Su, X., Yang, M., Hao, D., Guo, X. & Jiang, L. (2021). Marine Antifouling Coatings with Surface Topographies Triggered by Phase Segregation. *Journal of Colloid and Interface Science*.

PROPROS

NUTZUNG VON ECHTZEITDATEN ALS BASIS FÜR EINE VORAUSSCHAUENDE
PLANUNG UND STEUERUNG DER PRODUKTION MARITIMER SYSTEME

AUTOR

DIPL.-ING. HEIKO BUCHHOLZ	FR. LÜRSSEN WERFT GMBH & CO. KG
DR. BERNHARD URBAN	FR. LÜRSSEN WERFT GMBH & CO. KG
PROF. DR.-ING. DIPL.-WIRT.-ING. GÜNTHER SCHUH	WERKZEUGMASCHINENLABOR (WZL) DER RWTH AACHEN
ESBEN SCHUKAT, M.SC.	WERKZEUGMASCHINENLABOR (WZL) DER RWTH AACHEN
NIKLAS SCHÄFER, M.SC.DR.	WERKZEUGMASCHINENLABOR (WZL) DER RWTH AACHEN
DR. CARSTEN ZERBST	PROSTEP AG

1. EINLEITUNG UND MOTIVATION

Maritime Systeme wie Schiffe und U-Boote übertreffen oft bei weitem die Komplexität anderer Produkte. Das stellt Werften von der Teilefertigung über die Montage bis hin zur Ausrüstung vor große Herausforderungen. Neben der hohen Produktkomplexität führen geringe Stückzahlen und eine unzureichende Arbeitsplanqualität eine aufwendige Produktionsplanung und -steuerung. Die Planung der in Werften typische Baustellenmontage erfolgt zunächst in Monats- und Wochenplänen. Eine Feinplanung erfolgt erst durch Meister*innen und Vorarbeiter*innen mittels Schichtplänen, die in der Regel nur wenigen Mitarbeitern zugänglich sind. Sie werden in der Regel manuell erstellt und aktualisiert. Die daraus resultierende Intransparenz führt dazu, dass Planungsverantwortliche den jeweiligen Produktionsfortschritt nur eingeschränkt nachvollziehen können. Akute Probleme bleiben oft unerkannt. Schlechte Datenverfügbarkeit, geringe Planungsreifegrade und fehlende Prozessstandards sowie auftretende Produktänderungen während der Produktion verschärfen die Herausforderungen in der Produktion maritimer Systeme. Hinzu kommen betriebliche Störungen durch fehlendes Material, Maschinenausfälle sowie Verspätungen bei der Materialbereitstellung. Diese Störungsmuster führen zu Produktionsausfällen und verlängerten Durchlaufzeiten. Insbesondere führen diese Gründe zu einer aufwendigen Prozessplanung und -steuerung aufgrund unzureichender Arbeitsplanqualität und mangelnder Produktionsdaten.

Zur Beherrschung der vorgenannten Herausforderungen in der Produktion maritimer Systeme bedarf es einer Methodik, welche die Besonderheiten derart komplexer Systeme sowie ihrer Entstehungsprozesse berücksichtigt, um eine effiziente Produktionsplanung und -steuerung der flexibel einsetzbaren Ressourcen zu ermöglichen. Die zu entwickelnde

Methodik muss zudem proaktiv eine Optimierung der Produktionssteuerung vornehmen, um nicht erst auf Störungen zu reagieren, sondern diese vor dem Auftreten zu antizipieren und zu vermeiden. In diesem Kontext war das Ziel des Forschungsprojekts ProProS die Entwicklung, Umsetzung und Validierung einer Methodik zur proaktiven Produktionssteuerung. Mithilfe von tagesaktuellen Echtzeitdaten wird ein störungsfreier Ablauf, eine gleichmäßige und hohe Auslastung der Ressourcen sowie minimale Durchlaufzeiten und Reduzierung der Arbeits- und Materialpuffer angestrebt.

Im Forschungskonsortium hat die Fr. Lürssen Werft (FLW) als Konsortialführer und Anwendungspartner zunächst die Anforderungen definiert. Hierzu wurden von den Konsortialpartnern die Produktionsprozesse analysiert, weiterentwickelt und gemeinsam validiert. Für die Entwicklung der Produktionssteuerungsmethodik untersuchte das Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University geeignete Kennzahlen und Störungsindikatoren zur Definition eines Bewertungsmodells, mit dem Produktionsszenarien verglichen werden können. PROSTEP war verantwortlich für die Implementierung des Datenmodells und anschließender Entwicklung des Softwaredemonstrators. Mit Hilfe realer Produktionsdaten konnte so die Produktionssteuerungsmethodik im Softwaredemonstrator validiert werden. Das Vorhaben wurde gemäß Abb. 1 in vier Arbeitspakete unterteilt.



Abb. 1: Arbeitspaketstruktur

2. ANFORDERUNGSaufnahme

2.1. IST-ANALYSE

Im ersten Schritt wurde die Ist-Analyse beim Anwendungspartner durchgeführt. Hierbei wurden die Prozesse der schiffbaulichen Fertigung detailliert untersucht und abgebildet. Abb. 2 zeigt beispielhaft den Materialfluss in der Sektionsfertigung. Ein Brennteil für eine Sektion durchläuft eine Reihe von unterschiedlichen Prozessschritten bis zur abschließenden Sektionsmontage. Einige Prozessschritte können in parallel geschalteten Arbeitsstationen abgearbeitet werden. Aus der Vielfalt der Möglichkeiten ergeben sich beim Anwendungspartner 57 mögliche Routen eines einzelnen Bauteils von der Brennmachine bis zur Sektion.

In der Störungsanalyse wurden im Anschluss auf Basis von Änderungsmitteilungen, Erfahrungsberichten und Protokollen aus dem schiffbaulichen Shop-Floor-Management Störungen analysiert und hinsichtlich ihrer Auswirkungen und Häufigkeit ausgewertet. Die Auswertung in Abb. 3 zeigt, dass 80 % aller Störungen durch nur fünf gemeinsame Ursachen erklärt werden können. Aus der Störgrößenanalyse wurde abgeleitet, welche Informationen zu einem möglichst frühen Zeitpunkt gewonnen werden müssen. Darauf aufbauend wurde definiert, wie mit diesen Informationen eine proaktive Produktionssteuerung rechtzeitig eingreifen kann, um die Auswirkung der Störung zu minimieren oder zu verhindern.

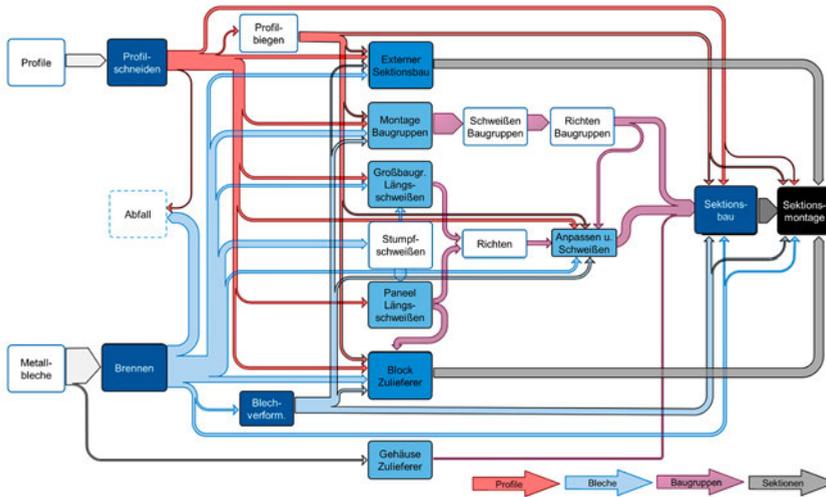


Abb. 2: Materialfluss in der Sektionsfertigung

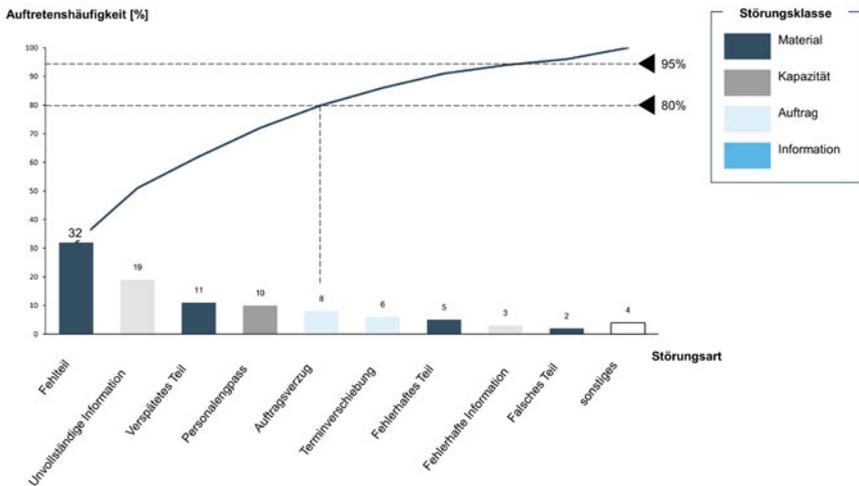


Abb. 3: Identifizierte Ursachen von Störungen und deren Häufigkeit

Die relevanten Eingangsinformationen für die proaktive Produktionssteuerung müssen weitgehend aus den bereits bestehenden Datenquellen der Werft entnommen werden. Hierzu wurde zunächst eine Prozesslandkarte (vgl. Abb. 4) erstellt. In Form von Online-Workshops wurde gemeinsam mit den Prozesseignern der FLW die Dokumentation vervollständigt und aktualisiert. Das Ergebnis ist eine aktuelle und lückenlose IST-Prozesslandschaft für den Sektionsbau und die Fundamentfertigung, jeweils inklusive der Bormontage. Aufgrund gewachsener Strukturen zeigt sich in der Prozesslandkarte eine hohe Komplexität, die sich durch eine weite Verteilung der relevanten Daten in verschiedenen Systemen und entsprechende Abhängigkeiten kennzeichnet. Aus der Prozesslandkarte wurden anschließend die notwendigen Schnittstellen zum Datenmodell abgeleitet.

Des Weiteren wurden verfügbare digitale Informationen von den einzelnen Maschinen- und Anlagen ermittelt, systematisiert und für die Entwicklung des Demonstrators nutzbar gemacht. Für benötigte, jedoch nicht verfügbare Informationen wurden Hard- und Softwareanpassungen definiert (vgl. Kap. 3).

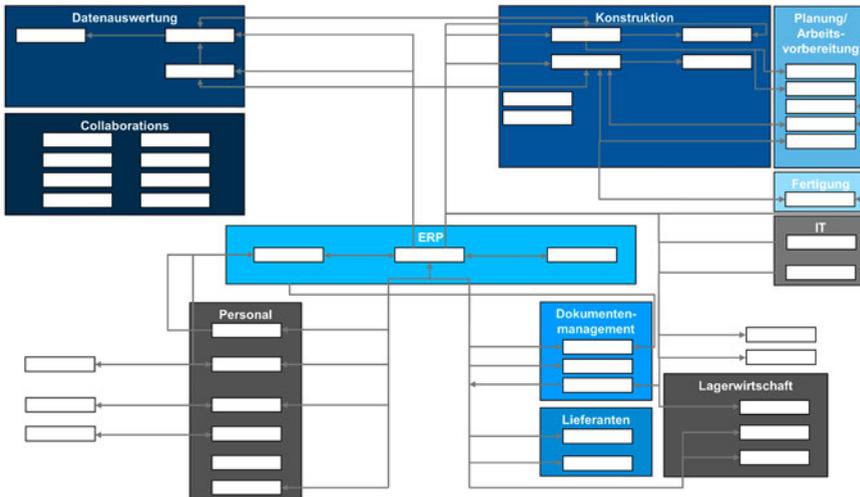


Abb. 4: Prozesslandkarte der IT-Anwendungen inkl. relevanter Schnittstellen (individuelle Anwendungen aus Geheimhaltungsgründen anonymisiert)

2.2. ANFORDERUNGEN AN DIE PROAKTIVE PRODUKTIONSSTEUERUNG

Vor Entwicklung der Methodik und Start der Software-Entwicklung wurden im Rahmen des ersten Arbeitspaketes Anforderungen definiert, mit denen eine Einheitlichkeit von Funktionsumfang, Optik und Bedienbarkeit erreicht werden sollte. Diese sind im Wesentlichen die Folgenden:

- › Transparenz schaffen
- › Such- & Abstimmungsaufwand reduzieren
- › Verlässliche, richtige und vollständige Informationen bereitstellen
- › Entscheidungshilfen durch Planspiele bereitstellen
- › Kritischen Pfad aufzeigen
- › Strukturierung der Planungsteilmengen in Sektion, Bereich, Raum ermöglichen
- › Qualität der (Vor-)Planungsinformationen erhöhen
- › Informationsquellen konsolidieren

- › Datenstruktur modularisieren
- › Vorgänge nach Möglichkeit automatisieren

2.3. DEFINITION DES SOLL-PROZESSES

Die Umstellung von manuellen zu softwareunterstützten Abläufen erforderte die Anpassung vorhandener Prozesse. Auch wurden prozessuale Verbesserungen bei der Gelegenheit berücksichtigt. Der Soll-Prozess wurde derart ausgelegt, dass eine Track-and-Trace-Funktionalität gegeben ist. Somit sind die einzelnen Bauteile bzw. Baugruppen identifizierbar und über die jeweilige Arbeitsstation auch ortbar.

Da in der zukünftigen Produktionssteuerung jedes Einzelteil wie auch Brennteile einzeln terminiert wird, ist es z. B. für das Brennen möglich geworden, die Verschachtelung „sortenreiner“ Materialpakete aufzugeben, und bedarfsorientiert nach Termin und Blechdicke zu schachteln. Die Reduzierung des Verschnitts um 1% birgt das Potential einer Kostenreduzierung pro Schiffbauprojekt von bis zu 85.000€. Dem gegenüber steht zwar Mehraufwand, da die Brennteile zu unterschiedlichen Baugruppen gehören, sortiert werden muss. Der Mehraufwand ist jedoch marginal. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Liegezeiten für die Brennteile reduziert werden können. Durch diese Herangehensweise können im Sinne des Projektzieles Liegezeiten, Fertigungsaufwand und Kosten reduziert werden.

Im nächsten Schritt wurden der Bedarf an notwendigen Hardwareinstallationen ermittelt. Abb. 5 zeigt, welche Hardwareinstallation je Prozessschritt notwendig sind. So sollen bspw. geschnittene Profile und Brennteile per Hands scanner erfasst werden, während Fortschritte im Sektionsbau manuell an einem Computerterminal eingegeben werden. Die hierbei gemachten Erkenntnisse und Erfahrungen konnten rückwirkend bei der Demonstrator-Entwicklung berücksichtigt werden.



Abb. 5: Hardware-Installationen für Track-and-Trace im definierten Soll-Prozess in der Sektionsfertigung

2.4. ANPASSUNG DES PLANUNGSPROZESSES

Ein Kernelement der Weiterentwicklung innerhalb des ProProS-Forschungsprojekts war die Anpassung der Planungsprozesse. Zum einen wurde die Planung der Prozesse bis zum Ende der Sektionsfertigung von der Vorwärts- auf eine Rückwärtsplanung umgestellt. Damit wird das Ziel eines möglichst späten Brennbeginns verfolgt (vgl. Abb. 6). Hierdurch wird der Konstruktionsvorlauf erhöht und gleichzeitig werden Lagerzeiten minimiert. Gleichzeitig wird die Granularität der Planung erhöht. Anstatt in starren Liefersteps zu planen, werden die Bauteile bedarfsorientiert in Gruppen zusammengefasst. Die Baufolge einer Sektion erfolgte entsprechend der definierten Liefersteps. Dies wird umgestellt und bereits im CAD-Modell vordefiniert, so dass hieraus automatisch eine Baufolge generiert werden kann.

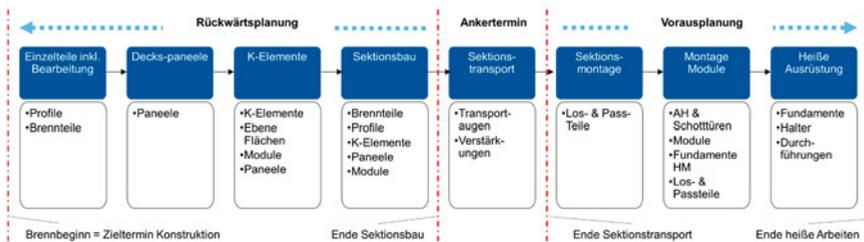


Abb. 6: Vorwärts- auf Rückwärtsplanung durch Terminierung ausgehend von einem Ankertermin

Für die genauere Planung der Durchlaufzeiten wurden im Rahmen der Entwicklung der Methodik Fertigungszeiten ermittelt und in einem Rechenmodell abgebildet (vgl. Prognose der Fertigungszeiten in Kap. 4). Dadurch werden Stillstandzeiten vermieden und eine höhere Auslastung der Anlagen erreicht.

3. DIGITALISIERUNG DES FERTIGUNGSPROZESSES

Für die Realisierung des in Abb. 5 dargestellten Soll-Prozesses waren die betroffenen Fertigungsbereiche mit digitaler Infrastruktur auszustatten. Die Digitalisierung hat den Zweck die erforderlichen Betriebsdaten mittels Track-and-Trace-Funktionalität zu erheben. Die Digitalisierung betraf im Wesentlichen die Hardwareinstallation von Computerterminals und Handscannern sowie deren Vernetzung zur Ermöglichung der digitalen Bauteilerkennung. Zusätzlich wurde eine MES-Software eingeführt.

In Abb. 7 ist schematisch dargestellt, wie die verschiedenen Arbeitsplätze für die Sektionsfertigung mit Scannern und PCs ausgestattet wurden. Die Vernetzung erfolgte über WLAN, was eine besondere Herausforderung darstellte, da eine Abschattung aufgrund der vielen Stahlstrukturen vermieden werden musste.

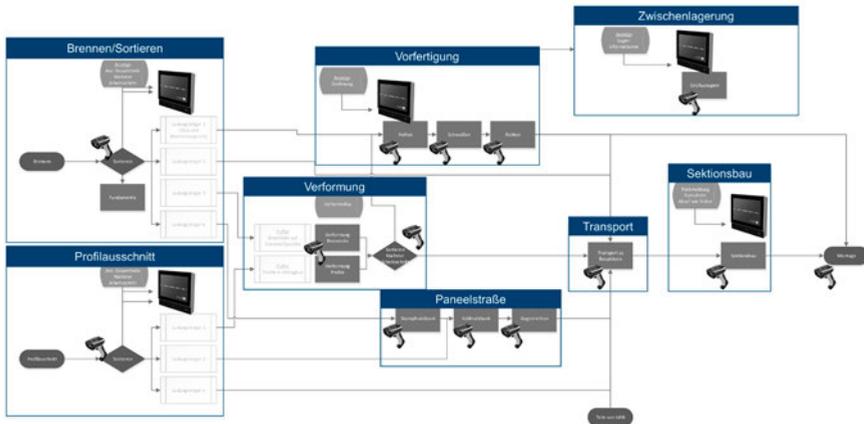


Abb. 7: Ausrüstung der verschiedenen Arbeitsstationen je Prozessschritt mit Scannern und PCs

Die installierten PCs an den Arbeitsstationen ermöglichen das Aufrufen von aktuellen Bauteilinformationen, wie z.B. Zeichnungen und Auftragsdaten. Die hinterlegte MES-Software wurde parallel in einem internen Vorhaben beim Anwenderunternehmen FLW entwickelt. Abb. 8 zeigt beispielhaft eine Arbeitsstation, an der digitale Informationen abgerufen werden können.



Abb. 8: Arbeitsplatz-PC mit integriertem Touchdisplay

Zum digitalen Einlesen der Bauteilinformationen an einer Arbeitsstation wurden verschiedene Codetypen, Aufpräge- und Leseverfahren auf Ihre Eignung untersucht. Um ein möglichst flexibel agieren zu können, wurde eine Kombination eines Data-Matrix-Code und Klartext gewählt, die mittels eines Lasers aufgebracht wird und mit einem Handscanner eingelesen werden kann.

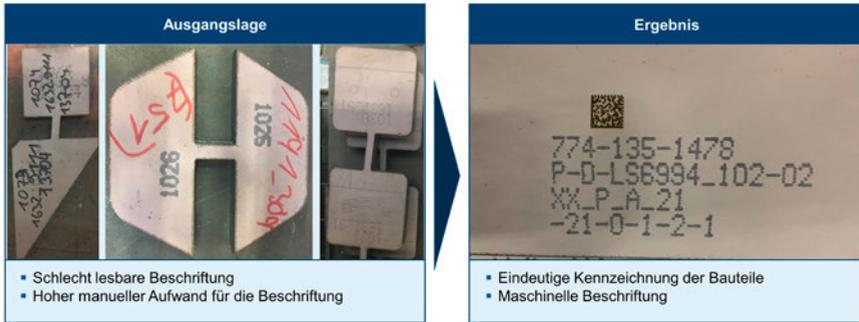


Abb. 9: Verbesserung der Bauteilkennung durch scanbare Data-Matrix-Codes und gedruckte Bauteilbezeichnungen

4. ENTWICKLUNG DER METHODIK ZUR PROAKTIVEN PRODUKTIONSSTEUERUNG

Nach der Anforderungsaufnahme erfolgte die Entwicklung der proaktiven Produktionssteuerungsmethodik parallel zur softwaretechnischen Entwicklung des Demonstrators. Anhand der Entwicklungsanforderungen und des Anwenderfeedbacks wurden iterativ Verbesserungen vorgenommen. Die finale Methodik ist in Abb. 10 dargestellt. Die Methodik umfasst die Erzeugung der Prozessstruktur, die Prognose der Fertigungszeiten, die Definition des Bewertungsmodells, die Generierung der alternativen Pfade und abschließend die proaktive Störungsbehandlung [1]. Das Bewertungsmodell spielt hier die zentrale Rolle bei der Auswahl der alternativen Pfade. Die Berücksichtigung echtzeitfähiger Produktionsdaten in einer kontinuierlichen Produktionsplanung und -steuerung macht die Neuartigkeit des Ansatzes aus und bildet daher einen zukunftsweisenden Schritt im Schiffbau [2].

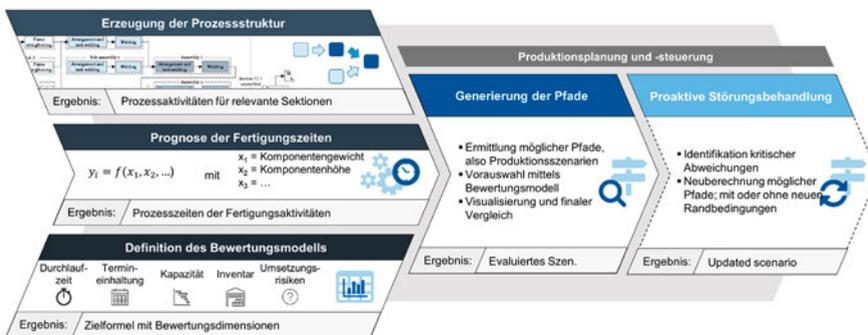


Abb. 10: Übersicht der Methodik zur proaktiven Produktionssteuerung [1]

4.1. ERZEUGUNG DER PROZESSSTRUKTUR

Die Prozessstruktur wird zunächst basierend auf der Produktionsmodellierung und der Baugruppenstruktur (MFG-Struktur) entwickelt. Sie zeigt die Prozessaktivitäten, die von

der Bauteilherstellung bis zum Sektionstransport reichen. Ein Entscheidungsbaum wurde erstellt, um diese Prozessstruktur zu definieren und später im Softwaredemonstrator umzusetzen.

4.2. PROGNOSE DER FERTIGUNGSZEITEN

Zur Vorhersage der Fertigungszeiten wurde ein datenbasiertes Prognoseverfahren entwickelt (vgl. Abb. 11) [3]. Dazu wurden im Anwendungsumfeld zunächst relevante Einflussfaktoren identifiziert und anschließend die spezifischen Berechnungsfunktionen erstellt. Diese Funktionen wurden im Demonstrator integriert, um erwartete Fertigungszeiten zu prognostizieren.

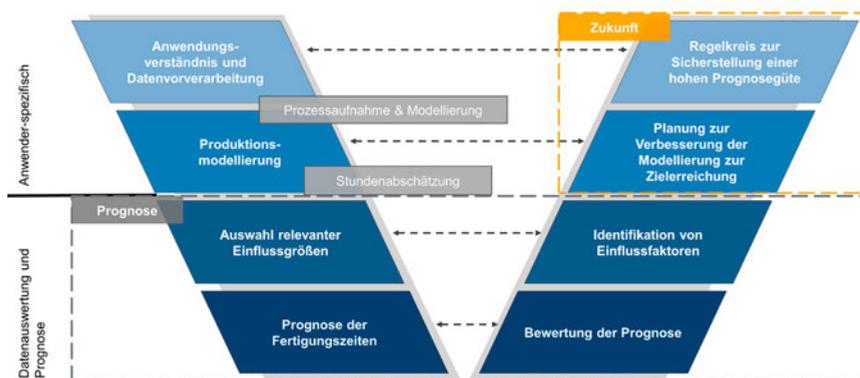


Abb. 11: Vorgehen zur datenbasierten Prognose der Fertigungszeiten [3]

Die identifizierten Einflussfaktoren als auch die Prognosegüte wurden anhand von historischen Daten des Anwendungspartners evaluiert. Für zwei beispielhaft ausgewählte Sektionen wurden die insgesamt prognostizierten Fertigungszeiten auf Sektionsebene mit den IST-Zeiten der realen Fertigung verglichen. Bei der Fertigung von Konstruktionselementen lag beispielsweise bei Zusammenstellung und Heften der Baugruppen die IST-Zeit etwa 40% über der prognostizierten Zeit, beim Schweißen der Baugruppen wurde eine Abweichung von maximal 9% festgestellt. Bei der Fertigung der Paneele ist hervorzuheben, dass die Prognoseabweichung auf der Kehlnahtbank je betrachteter Sektion nur 4% respektive 25% betrug. Die Prognosegenauigkeit ist daher stark von der betrachteten Sektion und den untersuchten Prozessaktivitäten abhängig. Diese Ergebnisse wurden mit Berechnungsformeln erzielt, die auf wenigen Einflussfaktoren wie dem Gewicht oder der Anzahl der Bleche einer Baugruppe basieren.

4.3. DEFINITION DES BEWERTUNGSMODELLS

Ein Bewertungsmodell wurde definiert, um generierte Pfade vergleichbar zu machen. Das entwickelte Bewertungsmodell ermöglicht die Evaluierung der generierten Pfade anhand verschiedener Bewertungsdimensionen. Die Zielfunktion berücksichtigt dabei die Prioritäten des Anwendungspartners und umfasst Bewertungsdimensionen wie Durchlauf-

zeiten, Pufferzeiten und Umsetzungsrisiken. Die einzelnen Bewertungsdimensionen werden normiert und gewichtet, um einen Gesamtwert für jeden Pfad zu ermitteln. [3]

4.4. GENERIERUNG DER PFADE

Mit den ersten drei Schritten der Methodik sind die Voraussetzungen geschaffen, um alternative Pfade für die Produktionsplanung zu generieren. Ein alternativer Pfad stellt hierbei ein mögliches Produktionsszenario dar. Eine Auswahl alternativer Pfade wird dabei mit Priorisierungsregeln und unter Berücksichtigung der Kapazitäten erstellt. Der Vergleich der alternativen Pfade erfolgt mit dem Bewertungsmodell. Zwar kann hiermit bereits eine Vorauswahl getroffen werden, jedoch muss final der Anwender das umzusetzende Planungsszenario aus den alternativen Pfaden auswählen.

4.5. PROAKTIVE STÖRUNGSBEHANDLUNG

Die proaktive Störungsbehandlung auf Basis der verfügbaren Echtzeitdaten aus der Produktion wird ermöglicht, indem bei Planabweichung erneut alternative Pfade ermittelt werden. Hierbei werden geänderte Rahmenbedingungen und der aktuelle Produktionsstatus berücksichtigt. Um eine echtzeitfähige Störungsbehandlung zu ermöglichen, wurde die Anwendung von Heuristiken als vielversprechend bewertet. Bei der Umsetzung des Demonstrators konnte gezeigt werden, dass die Anwendung der linearen Programmierung – im Gegensatz zu Heuristiken – mit vielfältigen Hindernissen in der Terminierung der Prozessaktivitäten verbunden ist. Bereits kleine Planungsumfänge verlängerten die Berechnungszeiten deutlich (> 60min bei mehr als einer Sektion und < 5 min Genauigkeit der Terminierung) und verhindern somit die Echtzeitfähigkeit. Die Anwendung der linearen Programmierung erwies sich somit aufgrund der großen Rechenzeiten daher als weniger praktikabel.

Die anzuwendenden Heuristiken konnten basierend auf Ansätzen der Produktionsplanung und -steuerung detailliert werden. So sind z. B. eine Priorisierung nach dem offenen Puffer oder dem geplanten Fertigstellungstermin der jeweiligen Prozessaktivität definiert worden. Jede der möglichen Priorisierungsregel werden dabei hinsichtlich der Anforderungen des Anwendungspartners bewertet, um so die relevanten Regeln auszuwählen.

5. SOFTWARETECHNISCHE UMSETZUNG DES DEMONSTRATORS

Die Umsetzung der im vorherigen Kapitel vorgestellten Methodik zur proaktiven Produktionssteuerung in ein reales IT-Tool ist entscheidend, um die Anwendbarkeit für reale Produktionsprozesse zu prüfen. Daher wurde im Januar 2021 mit der Implementierung eines Software-Demonstrators begonnen. Der Demonstrator ist als Webanwendung implementiert, die eine browserbasierte Benutzeroberfläche bietet. Der Server selbst nutzt das Low-Code-Framework von PROSTEP, so dass der Code für das Datenmanagement und den Remote-Zugang aus einer Beschreibung des Datenmodells generiert werden konnte. Somit konnte der Fokus auf den Code für die Benutzeroberfläche und die Geschäftslogik gelenkt werden. Zusätzlich werden Teile des OpenPDM-Integrations-

frameworks verwendet, um auf Informationen aus Quellen wie dem PDM und dem Track-and-Trace-System der Werften zuzugreifen. Um den Demonstrator ohne Integration in das Track-and-Trace-System der Werften testen zu können, wurde eine Komponente zur Simulation der Produktion hinzugefügt.

5.1. FUNKTIONALITÄTEN

Funktional ist das Kernstück des Demonstrators die vollständig automatisierte Planungsunterstützung für den Nutzer, die sich aus dem Planungsprozess ableiten lassen [4]. Die dafür notwendigen Schritte sind:

- › Tätigkeitsvorlage anwenden
- › Aufwand der Tätigkeit abschätzen
- › Ressourcen zuweisen
- › Zeitplan berechnen
- › Ressourceneinsatz berechnen
- › Lieferliste für Bauteile bereitstellen

Der Demonstrator kann automatisch das Aktivitätsnetz für eine aus dem Konstruktionsystem importierte, geplante Struktur berechnen. Der Template-Mechanismus unterstützt den gesamten Lebenszyklus von der ersten Heftschweißung bis zur Montage der Sektionen. Es lassen sich zwei verschiedene Phasen unterscheiden: die Unterbaugruppen-Phase, in der Baugruppen wie Träger oder Paneele erstellt werden, und die Montagephase, in der diese Unterbaugruppen zu immer größeren Einheiten zusammengefügt werden. Der Vorlagenmechanismus stützt sich auf Informationen sowohl aus der asdesigned als auch aus der asplanned Struktur, um die richtigen Vorlagen zuzuordnen, z. B. die Verwendung der Paneel-Linie gegenüber einem manuellen Montageprozess. Nach diesem Schritt wird der Produktionsaufwand mit Hilfe der Prognoseformeln aus der entwickelten Methodik abgeschätzt [5]. Anschließend muss der Anwender einer Tätigkeit die gewünschte Anzahl von Personen zuordnen. Dies kann manuell oder automatisch mit Hilfe einfacher Regeln geschehen, wie z.B. "Weise zwei Arbeiter eine Aufgabe zu, die zwischen sechs und zwölf Stunden dauert".

Nach diesem Schritt ist das gesamte Aktivitätsnetz für die Planung vorbereitet. Außerdem sind die Ressourcenverfügbarkeiten wie Schichtzeiten, Wochenenden und Feiertage in Form eines Ressourcenkalenders bekannt. Die Aufgabe der Terminplanung besteht darin, eine Aktivitätssequenz mit der besten Eignung zu finden und dabei alle gegebenen Beschränkungen zu berücksichtigen. Aus der Sicht des Ingenieurs ist die Reihenfolge in der Montagephase wenig oder gar nicht flexibel: Ein Träger sollte auf eine Deckplatte geschweißt werden, bevor ein Abschnitt erstellt wird. Die Reihenfolge der einzelnen Unterbaugruppen ist jedoch nicht durch die Montagereihenfolge vorgegeben, und diese

enthält den Großteil der Aktivitäten. Daher enthält der Demonstrator eine Komponente, die eine optimale Planungslösung erstellt. Für dieses Problem konnte keine der üblichen Komponenten herangezogen werden, da sie mit der Optimierung unter den gegebenen Zwangsbedingungen aus der Baureihenfolge schon bei kleinen Blöcken am Mengengerüst scheitern. Hier kommen schnell mehrere tausend einzelne Prozesse zusammen, die beim Finden der optimalen Lösung betrachtet werden müssen. Eine detaillierte Beschreibung dieser Komponenten wurde von PROSTEP im Jahr 2022 auf der COM-PIT-Konferenz präsentiert und ist im Tagungsband enthalten [6].

5.2. BENUTZEROBERFLÄCHE

Der Zweck des ProProS-Demonstrators besteht darin, die Terminplanung (neu) zu berechnen und später den Status in der Prüfphase anzuzeigen. Dies erfordert die Kommunikation mit menschlichen Benutzern, die über das Web-Frontend des ProProS-Servers erfolgt. Dieses Web-Frontend ermöglicht es dem Benutzer, grundlegende Einrichtungsaufgaben durchzuführen sowie die oben beschriebenen Funktionen auszuführen und deren Ergebnisse zu sehen. Beispiele aus der ProProS-Benutzeroberfläche sind in Abb. 13 abgebildet.

Die Schnittstelle nutzt modernste Technologien wie Angular, TypeScript-Programmierung und GraphQL-Kommunikation auf der Browser-Plattform. Sie unterstützt auch die rollenbasierte Zugriffskontrolle, die auch im Backend zu finden ist. Diese dient dazu, sowohl den Zugriff auf Daten als auch auf Funktionalitäten einzuschränken. Sie ermöglicht es dem Administrator Benutzer daran zu hindern Daten zu lesen oder manipulieren, die sie nicht lesen dürfen.

Bei der Definition der Schlüsselfunktionen war die wichtigste Entscheidung, die Daten für das ganze Schiff zu unterstützen. Vor allem bei der Entwicklung des Zeitplans macht die Handhabung zahlreicher Aktivitäten einen großen Unterschied. Die Entwicklung des Zeitplanungsmechanismus wurde dadurch vorangetrieben, dass die vorhandenen Lösungen nicht in der Lage waren, diese Größenordnung zu bewältigen. Bei anderen Themenbereichen lag der Fokus darauf, die Anzahl der Herausforderungen zu erhalten, diese aber nicht in ihrer größtmöglichen Komplexität zuzulassen. Es wurde dafür beispielsweise entschieden, die Aktivitäten auf den Bereich von der ersten Heftschweißung bis zur Endmontage des Abschnitts zu beschränken. Auf der Ressourcenseite werden nur drei verschiedene Qualifikationsniveaus der Arbeiter unterstützt.

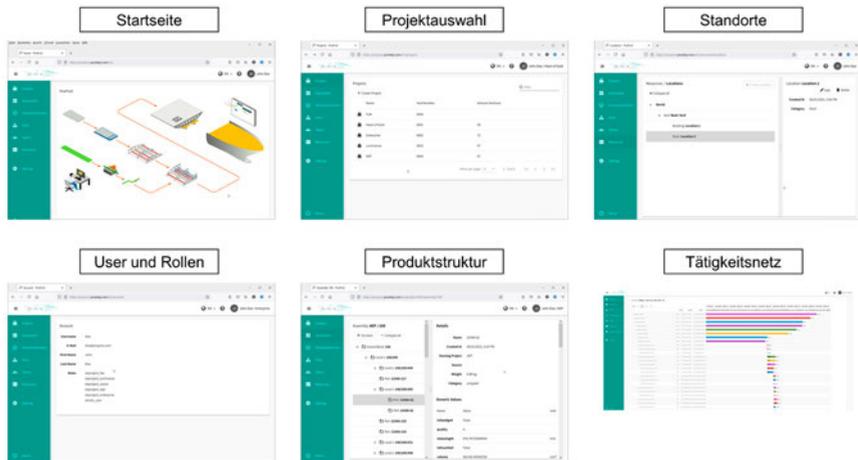


Abb. 12: Beispiele aus der ProProS-Benutzeroberfläche

Die Umsetzung des Demonstrators zeigt die Tragfähigkeit des beschriebenen Konzepts, insbesondere der zugrundeliegenden Methodik zur proaktiven Produktionssteuerung. Der Demonstrator kann erste Zeitpläne auf der Grundlage der geplanten Produktstruktur erstellen. Die Produktionsplaner können die Auswirkungen verschiedener Arbeitszuweisungen untersuchen und iterative optimieren, bevor sie diese in die Produktion übergeben. Auf der Grundlage der vom Track-and-Trace-System gesammelten Informationen kann der Demonstrator direktes Feedback zu verzögerten Aktivitäten geben und kontinuierliches Überprüfen des Fortschritts unterstützen.

6. VALIDIERUNG DER METHODIK ZUR PROAKTIVEN PRODUKTIONSSTEUERUNG

Die Validierung der entwickelten Methodik zur proaktiven Produktionssteuerung erfolgte durch eine qualitative Evaluation und anschließend die quantitative Evaluierung. In der qualitativen Validierungsphase wurde der Demonstrator in enger Zusammenarbeit mit Entwicklern und Anwendern in Workshops untersucht. Diese Phase zielte darauf ab, die Anforderungen aus der Praxis der Produktionsplanung und -steuerung zu bewerten und die Umsetzung im Demonstrator aus der Sicht der Anwender zu überprüfen. Dabei wurden Funktions- und Anwendungsvalidierungen durchgeführt. Die Ergebnisse bestätigten größtenteils die grundlegenden Rahmenbedingungen und Szenarienvergleiche im Demonstrator. Hierbei wurde deutlich, dass der Demonstrator bereits einen Mehrwert für die Anwender bot, da er die Analyse verschiedener Szenarien anhand der getätigten Einstellungen ermöglichte. Dabei wurden wichtige Kennzahlen zur Termintreue und Terminabweichung angezeigt. Allerdings fehlte noch eine Funktion zur übersichtlichen Vergleichbarkeit verschiedener Szenarien und Kennzahlen, was eine manuelle Analyse durch die Anwender erforderte. Trotz dieser Einschränkungen wurde die Relevanz des Demonstrators für die Digitalisierung in der Produktion betont, da er eine einheitliche Datenbasis schaffte und somit den Weg für weiterführende Datenanalysen ebnete. Insgesamt wurde festgestellt, dass im Demonstrator für einen den Einsatz in der täglichen

Produktionssteuerung einige Aspekte der realen Produktionskomplexität, wie die Berücksichtigung umfassender Ressourcenverfügbarkeit und Störungen im Prozessablauf, detaillierter dargestellt werden müssen.

Im Anschluss daran erfolgte in der quantitativen Validierung die zielgrößenbasierte Evaluierung der Ergebnisse. Diese erfolgte anhand von drei verschiedenen Szenarien, in denen die Ressourcenverfügbarkeit variiert wurde. Dabei wurden Personal- und Bauplatzkapazitäten berücksichtigt. Die Variation von Personalkapazitäten zeigte deutliche Einflüsse auf die erreichbaren Durchlaufzeiten. Zudem konnte beobachtet werden, dass die Ergebnisse der Planung durch Gewichtungen in der Optimierungsfunktion beeinflusst wurden, was auf die hohe Anzahl möglicher Kombinationen in diesem komplexen Problem hinwies. Die Verfügbarkeit von Bauplätzen wurde erfolgreich in die Terminierung integriert, was zu erwarteten Veränderungen in den Planungsergebnissen führte.

Zusammenfassend erfüllte der Demonstrator nach qualitativer und quantitativer Validierung einen Großteil der gestellten Anforderungen entweder vollständig oder als demonstrierbare Funktionalität. Dennoch gibt es noch Verbesserungspotenziale, darunter die Notwendigkeit einer besseren Validierungsansicht, die Szenarienvergleiche und erweiterte Einstellungsmöglichkeiten für die Optimierungsfunktion einschließt. Auch die Integration von statistischen Versuchen und der Risikosimulation wurde angeregt. In Bezug auf funktionale Erweiterungen wurde die Berücksichtigung von Transportprozessen, anpassbaren Ressourcenkapazitäten und eine detailliertere Berücksichtigung der Organisationsstruktur, einschließlich Kostenstellenstrukturen und Rechtevergaben, als zukünftige Entwicklungsziele vorgeschlagen. Insgesamt bietet der Softwaredemonstrator somit die Basis zur Entwicklung eines umfassenden Tools der Produktionsplanung und -steuerung und somit zur Erreichung eines digitalen Zwillings des maritimen Produktionssystems. [1,7]

7. ZUSAMMENFASSUNG

Die Produktion komplexer maritimer Systeme stellt Werften vor große Herausforderungen. Geringe Stückzahlen und parallelisierter Prozesse führen zu einer aufwendigen Produktionsplanung und -steuerung. Auf potentielle Störungen kann in der Regel nicht optimal reagiert werden. Daher war das Ziel des ProProS-Forschungsprojekts die Entwicklung der Methodik zur proaktiven Produktionssteuerung auf Grundlage von tagesaktuellen Echtzeitdaten, um einen störungsfreien Ablauf, eine gleichmäßige und hohe Auslastung der Ressourcen sowie minimale Durchlaufzeiten und Reduzierung der Arbeits- und Materialpuffer anzustreben.

Auf der Basis der Analyse der bestehenden Prozesse wurden neue, digital-unterstützte Prozesse definiert, die es erlauben den Status der Bauteile in Echtzeit zu erfassen. Mit Hilfe der in Algorithmen umgesetzte Methodik konnte eine Demonstrator-Software entwickelt werden, die eine proaktive Produktionssteuerung ermöglicht und damit die Auswirkungen von potentiellen Störungen minimieren kann.

Die Validierung des Demonstrators und somit der entwickelten Produktionssteuerungsmethodik erfolgte in Zusammenarbeit mit Entwicklern und Anwendern. Obwohl der Demonstrator einige Realitätsvereinfachungen aufwies, erfüllte er bereits wichtige Anforderungen und bot Anwendern die Möglichkeit, verschiedene Szenarien zu analysieren. Die quantitative Validierung umfasste die zielgrößenbasierte Evaluierung dreier Szenarien mit variierten Ressourcenverfügbarkeiten. Insgesamt wurden mit den Arbeiten im Forschungsprojekt somit entscheidende Verbesserungen in der Digitalisierung und der Produktionssteuerung beim Anwenderunternehmen erzielt. Die Vorteile der Methodik zur proaktiven Produktionssteuerung können durch unternehmensspezifische Adaption des Demonstrators ebenso auf vergleichbare Anwenderunternehmen erreicht werden. Abschließend bestehen Potenziale in funktionalen Erweiterungen, um den industriellen Einsatz zu steigern.

DANKSAGUNG

Das Verbundprojekt ProProS „Proaktive Produktionssteuerung für die Produktion maritimer Systeme“ (Förderkennzeichen 03SX492) wurde durch die Förderung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz ermöglicht. Hierfür möchten sich die Autoren im Namen des gesamten Konsortiums herzlich bedanken. Dieser Dank gilt ebenso den Mitarbeitern des Projektträgers Jülich für die administrative Unterstützung des Vorhabens während der Projektlaufzeit.

LITERATUR

- [1] Burggräf, P., Aldon, T., Schäfer, N. (2022) Application of a Digital Twin for Proactive Production Planning", SNAME Maritime Convention 2022.
- [2] Burggräf, P., Aldon, T., Müller, K., Vierschilling, S., Minderjahn, R., Schäfer, N. (2021) "Zielgerichtete Digitalisierung der Produktionssteuerung und -planung: Echtzeitfähigkeit in der schiffbaulichen Fertigung", WT Werkstattstechnik, Bd. 111, Nr. 4.
- [3] Janke, T., Schäfer, N., Bötter, K. (2023) „Bewertungsmodell zur proaktiven Produktionssteuerung im Schiffsbau: Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt ProProS“, Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF), Jahrg. 118, Heft 1–2.
- [4] Zerbst, C., Lutz, U., Bitomsky, J., Sonnenberg, N. (2022) „Plan, Do, Check, Act: Enabling the Deming Cycle for Ship Production“, ICCAS 2022.
- [5] Burggräf, P., Aldon, T., Schäfer, N., Fulterer, J. (2022) „Enabling, Individual Part Production Planning in Shipbuilding: Machine-Learning-Assisted Prediction of Production Times“, COMPIT Proceedings.
- [6] Zerbst, C., Lutz, U., Danetzky, A. (2022) „Concept to Reality: Implementing a Digital Twin for Ship Production“, COMPIT Proceedings.
- [7] Burggräf, P., Aldon, T., Minderjahn, R., Schäfer, N., Fassmer, T. (2023) "Application of stochastic risk simulation to increase depth of production planning", International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, [dx.doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2023.100545](https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2023.100545).

SAMSON

SCHIFFBAULICHE ANWENDUNGEN VON METHODEN ZUR STRÖMUNGSKONTROLLE

AUTOREN

FARHAN MATIN, M. SC.	VAN DER VELDEN BARKEMEYER GMBH, HAMBURG
DIPL.-ING. ALEXANDER HYLLA	VAN DER VELDEN BARKEMEYER GMBH, HAMBURG
PROF. DR.-ING. SVEN GRUNDMANN	LSM LEHRSTUHL STRÖMUNGSMECHANIK, UNIVERSITÄT ROSTOCK
DIPL.-ING. TOBIAS BESTIER	LSM LEHRSTUHL STRÖMUNGSMECHANIK, UNIVERSITÄT ROSTOCK
MATTHIAS FROMM, M. SC.	LSM LEHRSTUHL STRÖMUNGSMECHANIK, UNIVERSITÄT ROSTOCK
PROF. DR.-ING. JÖRN KRÖGER	HSVA HAMBURGISCHE SCHIFFBAU-VERSUCHSANSTALT GMBH
DIPL.-ING. MATTHIAS FROMM	HSVA HAMBURGISCHE SCHIFFBAU-VERSUCHSANSTALT GMBH
DIPL.-ING. JOHANNES WILL	HSVA HAMBURGISCHE SCHIFFBAU-VERSUCHSANSTALT GMBH
DIPL.-ING. LUTZ KLEINSORGE	MECKLENBURGER METALLGUSS GMBH, WAREN
DIPL.-ING. ACHIM FISCHER	DEZIBEL ENGINEERING GMBH, MÜNCHEN
PHILIPP WIEDEMER, M. SC.	DEZIBEL ENGINEERING GMBH, MÜNCHEN

1. EINLEITUNG

Im SAMSON-Projekt wurden einige Ansätze zur Verbesserung von Manövrierfähigkeit, Energieeffizienz und Sicherheit durch passive und aktive Strömungskontrolle beforscht. Alle Partner trugen spezifische Forschungsvorhaben bei. Ziel ist die Steigerung der Manövrierfähigkeit und die Reduktion des Energieverbrauchs an Rumpf, Ruder und Propeller durch passive Elemente wie Tuberkel und aktive Strömungsbeeinflussung. Strömungskontrolltechnologien können nicht nur Treibstoffkosten senken, sondern auch die Manövrierfähigkeit bei extremen Bedingungen wie starkem Wind oder hoher See verbessern, was die Sicherheit von Crew, Fracht und Umwelt steigert.

2. ENTWICKLUNGEN VON TECHNOLOGIEN UND ANALYSEMETHODEN

Das SAMSON-Projekt hat eine breite Palette von technologischen Entwicklungen und Analysemethoden hervorgebracht, die als Grundlage für innovative Fortschritte im maritimen Sektor dienen können. Die enge Kooperation der Projektpartner führte zur effizienten und

zweckmäßigen Nutzung experimenteller Verfahren, numerischer Simulationen und Auswertungsmethoden.

2.1. ENTWICKLUNG TECHNOLOGIEN

Die Entwicklung von Technologien zur Strömungskontrolle war ein zentrales Element des SAMSON-Projekts. Die Technologien sind passiver und aktiver Natur. Als passive Strömungskontrolle wurden gewellte Vorkanten (Tuberkel) entwickelt, inspiriert von den Tuberkelvorkanten der Buckelwale. Dabei leistete IB Fischer (CFD+engineering GmbH) grundlegende Arbeiten, indem sie die grundlegenden Prinzipien der passiven Strömungskontrolle mittels Tuberkelvorkanten als eine Methode zur Beeinflussung der Grenzschicht und Ablösungen identifizierten. Propeller mit Tuberkelvorkanten wurden entwickelt und getestet, wie auch Schiffsruder mit Tuberkelvorkanten und aktiver Strömungskontrolle mittels intermittierend ausblasender Jets (siehe Abbildung 1 und 2). Ein mit Druck beaufschlagter fluidischer Oszillator speist an jedem seiner zwei zueinander phasenverschobenen Ausgängen eine Vielzahl an Jets (siehe Abbildung 1 und 2).

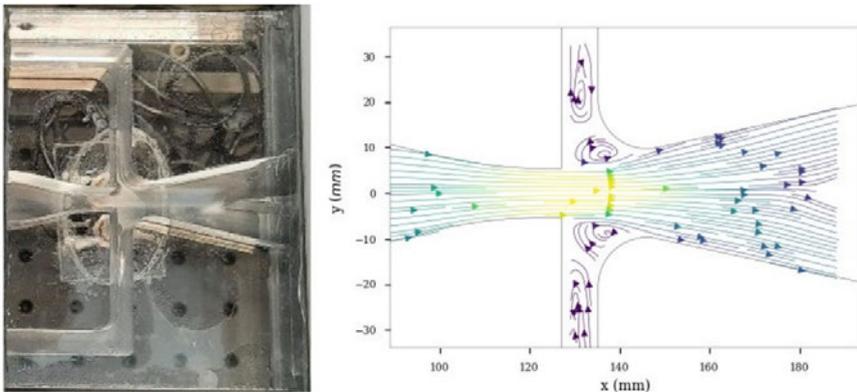


Abb. 1: Links Pulsjet Oszillator, rechts gemittelttes Strömungsfeld im Oszillator

Die Entwicklung der fluidischen Oszillatoren für den Einsatz im Wasser fundiert im Wesentlichen auf Pulsjet Aktuatoren, wie sie in Arwatz et al. 2008 beschrieben sind. Die verschiedenen Iterationsstufen der Oszillatoren wurden mittels 3D-Druck hergestellt, um die verschiedenen Geometrieparameter schnell anpassen zu können. Für den Einsatz in Wasser wurden robuste Oszillatoren in Benchtop Versuchen entwickelt. Besonderes Augenmerk galt dabei dem schnellen und vollständigen Wechseln der beiden Auslässe des Oszillators.

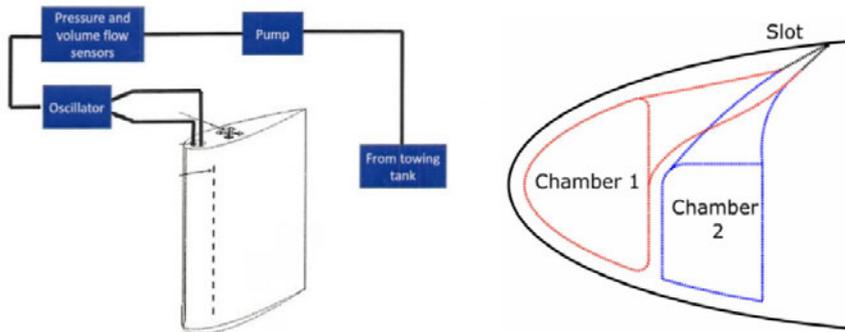


Abb. 2: Schematischer Aufbau des Ruders mit aktiver Strömungsbeeinflussungstechnologie

2.2. ENTWICKLUNG EXPERIMENTELLE VERFAHREN

Alle Partner führten umfangreiche Experimente durch. Diese umfassten die Untersuchung von Rudermodellen unterschiedlicher Konfigurationen und Größen, sowie auch am Rumpf des Modells eines Mehrzweckschiffs an dem die Eignung zur Verbesserung des Manövrierhaltens untersucht wurde, sowie am Japan Bulk Carrier, an dem die Eignung zur Verbesserung der Propulsionseffizienz untersucht wurde.

Die Universität Rostock (LSM) spielte eine entscheidende Rolle bei der Etablierung experimenteller Grundlagen für die Aktuation. Ein neues Unterwasser PIV-System (Particle Image Velocimetry) wurde angeschafft und zur Messung von Geschwindigkeitsfeldern genutzt. Ihre Expertise in der Strömungsanalyse und Messtechnik trug dazu bei, zusammen mit der HSVA und VDVB/DMC Modellversuche zu planen und durchzuführen. Dies ermöglichte die Gewinnung experimenteller Daten zur Bewertung der Ablösungskontrolle.

Dezibel Engineering führte Windkanalversuche durch, um die Auswirkungen der Tuberkelgeometrien auf verschiedene Profiltypen zu untersuchen. Durch die Variation der Turbulenzbedingungen wurden die Robustheit der Tuberkelwirkung unter verschiedenen Strömungsbedingungen bewertet. Diese Versuchsanordnungen wurden sorgfältig gestaltet, um realistische Anwendungen bestmöglich abzubilden und aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen.

2.3. ENTWICKLUNG NUMERISCHE VERFAHREN

Im SAMSON-Projekt wurden numerische Simulationen eingesetzt, um komplexe Strömungsdynamiken zu untersuchen. Partner wie Van der Velden Barkemeyer, die Universität Rostock (LSM) und Dezibel Engineering führten Simulationen durch, um die Auswirkungen von (Tuberkel)-Profilen bei verschiedenen Strömungsbedingungen zu analysieren. Dabei wurden Sensitivitätsanalysen und die dynamische Modenzerlegung (DMD) verwendet, um Einflussfaktoren zu identifizieren und gezielte Optimierungen vorzunehmen. Für Propeller wurde ein Prozess zur Modifikation der Vorderkanten entwickelt. Die HSVA nutzte einen adjungierten Strömungslöser, um die Sensitivität des Strömungsfelds zu analysieren und geeignete Standorte für fluidische Aktuatoren zu identifizieren.

Im Rahmen des AP2 Analysewerkzeugs wurde der CFD-Löser FreSCo+ um die Möglichkeit erweitert, die Strömung unter Einfluss von fluidischen Aktuatoren zu analysieren. Diese Methode half bei der Platzierung der Aktuatoren für die nachfolgenden Modellversuche. Die Methode wurde durch einen Testfall validiert, der eine 2D-Strömung mit Störgeometrie und Zielfunktionen wie Widerstand und Auftrieb umfasste (siehe Abbildung 3).

Die Implementierung dieser Methode wurde für geeignet befunden und unterstützte die Voruntersuchungen.

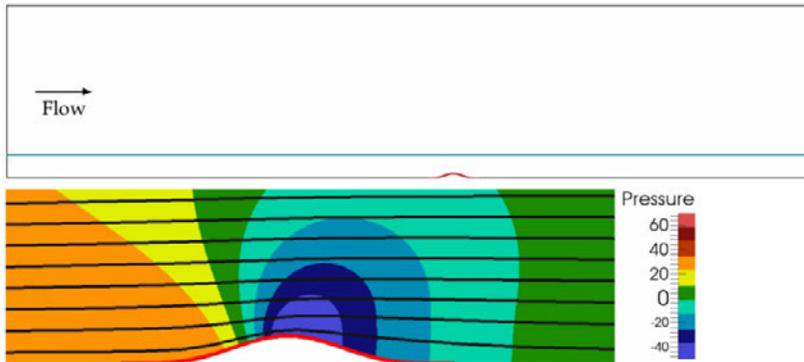


Abb. 3: Fluiddomain mit Störgeometrie, Druckverlauf

Die Mecklenburger Metall-Guss (MMG) arbeitete an der Strömungskontrolle an Propellern, um das Auftreten von Strömungsablösungen zu verhindern und den Schub in Vorwärtsrichtung aufrechtzuerhalten. Dies wurde durch die Modifikation der Flügelvorderkante erreicht, indem zusätzliche Blattschnitte basierend auf Tuberkel-Parametern interpoliert und angepasst wurden. Numerische Simulationen halfen bei der Identifizierung vielversprechender Tuberkelgeometrien und ermöglichten die Visualisierung komplexer Strömungsmuster sowie die Berechnung von Auftriebs- und Widerstandspolaren.

In Zusammenarbeit mit Dezibel Engineering wurden Werkzeuge und Arbeitsabläufe entwickelt, um Rudern und Stabilisatoren mittels CFD-Simulationen zu analysieren. Ziel war es, Tuberkelgeometrien vorab durch Simulationen auszuwählen und so experimentelle Versuche zu reduzieren. Die CFD-Simulationen lieferten auch ein besseres Verständnis für die Funktionsweise der Tuberkel, was wiederum in die Weiterentwicklung und Auswahl der Tuberkelformen einbezogen wurde. Das CFD-Modell wurde entsprechend dem experimentellen Versuchsaufbau gestaltet, um eine direkte Validierung zwischen CFD-Simulation und Experiment zu ermöglichen.

2.4. ENTWICKLUNG AUSWERTUNGSVERFHREN

Im Rahmen des SAMSON-Projekts wurden gründliche Analysemethoden angewendet, die sowohl experimentelle als auch numerische Daten berücksichtigten. Dies umfasste die Erstellung von Auftriebs- und Widerstandspolaren, um die Leistung der untersuchten Profile zu bewerten.

Die Van der Velden Barkemeyer GmbH (VDVB) entwickelte innovative Auswertungsmethoden für aktuierte Rudertechniken, einschließlich Strömungsvisualisierungen und detaillierter Analysen der Strömungsprofile. Die Auswertung umfasste auch die Untersuchung von Strömungsablösungen, Wirbelstrukturen und Ablösestellen, um die Effekte der Tuberkelgeometrien zu verstehen und Optimierungsstrategien abzuleiten.

Zusätzlich wurden spezielle Auswertungsverfahren wie die Proper Orthogonal Decomposition (POD) verwendet, um relevante Strömungsmuster zu identifizieren und Zusammenhänge zwischen Aktuationsparametern und Strömungsverhalten aufzudecken. Die Entwicklung geeigneter Auswertungsmethoden erfolgte in enger Zusammenarbeit der Konsortiumsmitglieder, wobei die Universität Rostock (URO) und VDVB Expertise in Datenanalysemethoden einbrachten.

Dezibel Engineering simulierte das Schiff-Nachstromfeld als Grundlage für die Dynamic Mode Decomposition Analysen (DMD) in späteren Arbeitspaketen. Die Simulation umfasste das Schleppkanal-Versuchsmodell der HSVA mit den korrekten Schiffmodellabmessungen und verwendete die CFD-Software StarCCM+. Die DMD-Analysen dienten der Dimensionsreduktion und Datenanalyse.

3. ANWENDUNGSFÄLLE DER ABLÖSEKONTROLLE

Mit den Anwendungsfällen wurde die Wirksamkeit der entwickelten Technologien demonstriert. Es konnte gezeigt werden, wie vielfältig und wirkungsvoll die Techniken der aktiven Strömungsbeeinflussung mittels fluidischer Aktuatoren sind, und in welcher Weise passive Techniken der Tuberkelvorkanten im Schiffbau eingesetzt werden können. Die Ergebnisse können zur Steigerung der Effizienz und Leistungsfähigkeit von Schiffen und zur Reduzierung von Emissionen beitragen.

Die Kombination aus experimentellen Daten und CFD-Simulationen hat dazu beigetragen, ein tieferes Verständnis für die Leistungsfähigkeit der Aktuatoren und die Auswirkungen der Strömungsbeeinflussung auf die Aspekte der Energieeffizienz und Manövrierbarkeit zu entwickeln.

Insgesamt verdeutlicht die intensive Forschung im Bereich der aktiven Strömungsbeeinflussung innerhalb des SAMSON-Projekts, in enger Zusammenarbeit mit der Universität Rostock (LSM), das transformative Potenzial dieser Technologie für die maritime Industrie. Die Kombination aus experimentellem Wissen und numerischer Simulation ebnet den Weg für Innovationen in Bezug auf Effizienz, Manövrierfähigkeit und Sicherheit von Schiffen.

3.1. RUDER

Im Anwendungsfall Ruder wurden als Maßnahme passiver Strömungskontrolle drei verschiedene Tuberkelgeometrien untersucht, um Verbesserungen beim Ablöseverhalten analysieren. Es wurden vier RANS-Simulationen mit vier Geometrien durchgeführt - G001, G005, G020 und G026. Hier ist G001 das Ruder mit gerader Kante. (vgl. Abbildung 5: Auftriebsbeiwerte für die vier untersuchten VDVB Ruder). Untersucht wurden Winkelbereiche von -3° bis 45° . Dynamische Versuche wurden mit konstanten Drehraten des Ruderanstellwinkels gefahren, statische Versuche mit diskreten, festen Ruderanstellwinkeln. Ergebnisse zeigen große Abhängigkeit von der Dynamik des Ruderlegewinkels und zeigen bei dynamischen Versuchen deutlich größere Auftriebe und verzögerte Ablösung.

Ihre vergleichenden Ergebnisse lassen sich am besten anhand der Auftriebs-, Widerstands- und Drehmomentkoeffizienten zusammenfassen. Abbildung 5 zeigt eine vergleichende Darstellung dieser Koeffizienten.

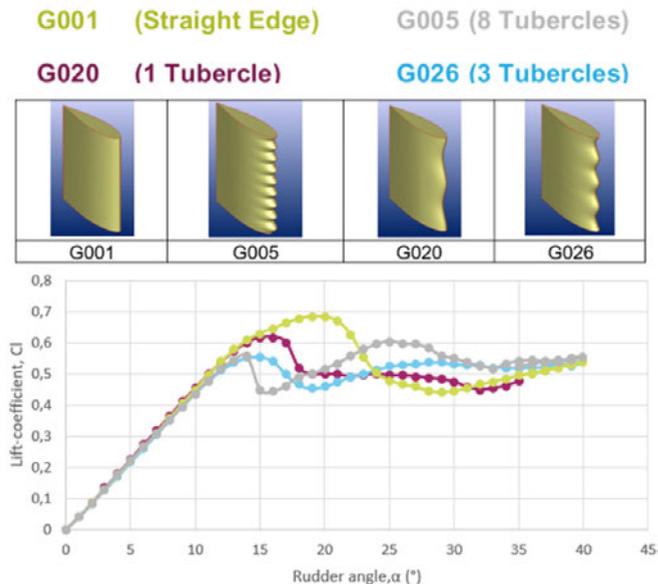


Abb. 4: VDVB Tuberkel-Ruder Geometrien und Auftriebsbeiwerte für die vier untersuchten VDVB Ruder

Ergebnisse in Abbildung 4 zeigen ein klares Muster, das sich aus dem Bereich nach dem Strömungsabriss jeder Geometrie ergibt. Der Strömungsabriss scheint mit zunehmender Anzahl der Tuberkel von 0 Tuberkeln (gerade Kante) bis 8 Tuberkel-Ruder in einem früheren Winkel einzutreten. Für den Auftrieb zeigt sich der höchste Auftrieb unmittelbar nach dem Strömungsabriss bei dem Ruder mit gerader Kante, wobei der Auftriebskoeffizient mit zunehmender Anzahl von Tuberkeln am Ruder abnimmt. Ähnlich verhält es sich mit dem Widerstand. Der geringste Widerstand in der unmittelbaren Nachtrag-Region stammt vom Ruder mit gerader Kante, wobei der Widerstand mit zunehmender Anzahl von Tuberkeln

steigt. Ein interessanter Aspekt ist, dass das Drehmoment am Ruderschaft bei den Tuberkel-Rudern im Vergleich zu den Rudern mit gerader Kante immer geringer wird.

Diese Ergebnisse lassen die Tuberkel-Ruder nicht im besten Licht erscheinen, da man sich das Gegenteil erhofft hatte, d.h. Tuberkelruder sollten theoretisch den Strömungsabriss verzögern. Das scheint jedoch eindeutig nicht der Fall zu sein.

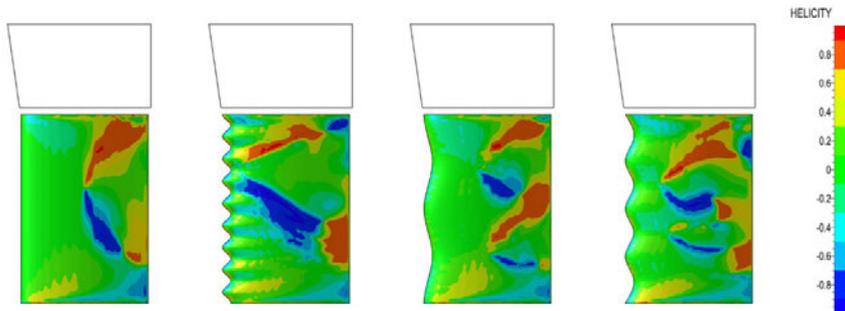


Abb. 5: Helicity auf der Saugseite aller Tuberkelruder bei 15° Anstellwinkel

Bei 15° (Abbildung 5) werden starke Wirbel herausgebildet, die sich der Vorderkante der Ruder zu nähern scheinen. Bei diesem Winkel ist nur das Ruder mit 8 Tuberkeln (zweite von links) vollständig abgelöst, daher der Abfall des Auftriebsbeiwerts, der in der zuvor dargestellten C_l -Kurve zu sehen ist. In der normalisierten Helicity Verteilung ist dies an den beiden großen Wirbeln zu erkennen, die direkt an der Vorderkante beginnen. Hier ist die Strömung vollständig abgelöst.

Im Arbeitspaket für aktive Strömungskontrolle wurde weiterhin als Maßnahme in Experimenten durch Aktuation die Ablösung der Strömung verzögert bzw. verhindert werden und der maximale Auftrieb erhöht werden. Die entwickelten Technologien ermöglichen eine effiziente Beeinflussung der Strömung um das Ruderprofil. Drei verschiedene Volumenströme wurden appliziert: $Q_1=30\text{L}/\text{min}$, $Q_2=60\text{L}/\text{min}$, $Q_3=90\text{L}/\text{min}$.

Parallel zu Simulationen wurden umfangreiche CFD-Simulationen durchgeführt, die es ermöglichten, verschiedene Aspekte der aktiven Strömungsbeeinflussung zu analysieren, einschließlich der Untersuchung von Konfigurationen, die experimentell nicht realisiert werden konnten. Zur Simulation der aktuierten Strömungsbeeinflussung des Ruders wurde eine synthetische Strahl-Randbedingung implementiert und auf bestimmte Flächen angewandt, die die gleiche Anordnung der im Modellversuch verwendeten Strahlen nachahmen.

Abbildung 6 zeigt, dass der höchste Durchfluss nicht nur den maximalen c_l -Wert und einen verzögerten Strömungsabriss bewirkt, sondern auch einen durchgängig höheren c_l -Wert über den gesamten beobachteten Bereich. Es ist jedoch interessant festzustellen, dass der Fall, in dem keine Anregung erfolgt, bessere Ergebnisse liefert als die beiden Fälle mit niedrigeren Durchflussraten Q_1 und Q_2 . Für die gegebene Reynoldszahl, die einer Frei-

strahlgeschwindigkeit von 2,5 m/s entspricht, erweisen sich Q1 und Q2 als nachteilig für eine höhere Auftriebserzeugung. Man beachte, dass 2,5 m/s die maximale Fahrgeschwindigkeit ist, die während des Modellversuchs angewendet wurde.

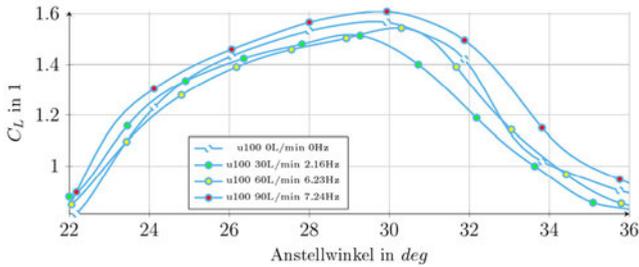


Abb. 6: Die drei für den Modellversuch gewählten Strömungsgeschwindigkeiten im Vergleich zu keiner Betätigung (gestrichelte Linie). u100 bezieht sich auf 100 % der Geschwindigkeit des Modellversuchsschlittens von 2,5 m/s

Abbildung 7 zeigt, wie der maximale Auftrieb stark zunimmt, wenn alle 20 Düsen aktiviert sind, und zeigt auch eine verzögerte Ablösung. Wenn nur 50 % der (oberen) Düsen gezündet werden, ist das Ergebnis etwas ambivalent. Einerseits wird ein geringerer maximaler Auftrieb erreicht, andererseits kommt es zu einem deutlich verzögerten Strömungsabriss, der erst bei fast 33° auftritt. Dieses Ergebnis ist sehr ermutigend, denn es zeigt das Potenzial einer intelligenten Zuweisung von Düsen. Wenn ein ähnlicher oder sogar noch besserer Gewinn an Manövrierfähigkeit erreicht wird, indem die Hauptpumpe mit 50 % Leistung betrieben wird, oder wenn es im Falle einer Doppelpumpenanlage möglich ist, nur eine Pumpe zu betreiben, bedeutet dies einen massiven Gewinn an Energieeffizienz.

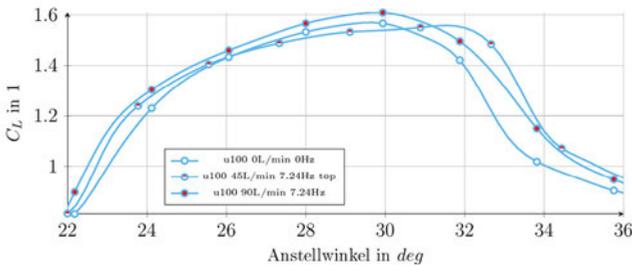


Abb. 7: CFD Simulationen 'Baseline', aktiviert Q3 20-Jets, aktiviert 0.5*Q3 10-Jets

Die Entwicklung eines Demonstrators des aktiven Ruders erfolgte entlang der Schritte der morphologischen Designstudie, mit der die Identifikation und Analyse verschiedener Designvarianten stattfand.

3.2. FLOSSENSTABILISATOREN

In diesem Teilpaket wurde geplant, einen dynamischen Stabilisatorversuch im Schleppkanal des LSM durchzuführen. Aufgrund von vorübergehenden Problemen mit der Verfüg-

barkeit des Schleppkanals wurde der Versuch jedoch als Teil des Ruder-Demonstratorversuchs umgesetzt. Dabei wurde ein Rudermodell verwendet, das in einen beweglichen Teil und einen unbeweglichen Teil unterteilt ist. Der grüne Teil des Modells wurde beim Stabilisatorversuch mit der Anstellung des Profils rotiert (siehe Abbildung 8).

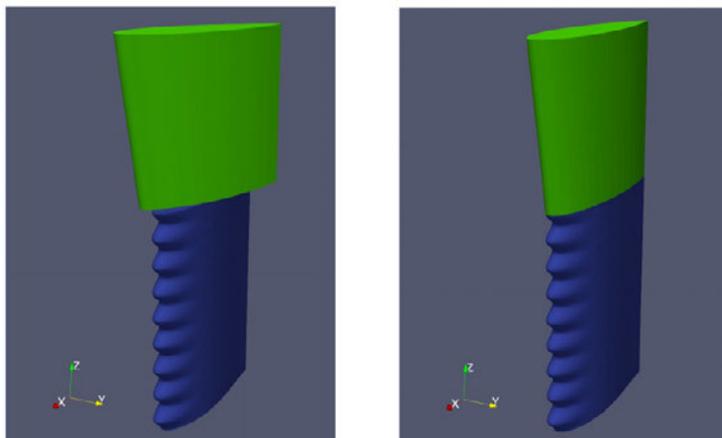


Abb. 8: Anstellwinkel (links Ruder-Versuch, rechts Flossenstabilisator-Versuch).

Die Ergebnisse des Versuchs zeigten, dass das Basisprofil bei niedrigeren Schleppgeschwindigkeiten einen höheren Auftrieb hatte als die Tuberkelvarianten. Diese Abhängigkeit verringerte sich bei höheren Geschwindigkeiten, wobei der Auftrieb des Profils G005 als Ausnahme bereits bei 50% der Geschwindigkeit größer war als der Auftrieb der Basisvariante. Aufgrund der Rotation des oberen Teils konnte das Stabilisatormodell nicht bei 100% gemessen werden, da die hydrodynamische Auftriebsfläche und die Kräfte deutlich zunahmen.

Der Seegangversuch wurde im ruhigen Schleppkanal mit angeregter Rollbewegung des Schiffmodells durchgeführt. Dabei wurden Stabilisatoren mit und ohne Tuberkel an einem Modell eines Kreuzfahrtschiffs getestet. Die Tuberkel-Stabilisatoren zeigten im statischen Verhalten einen geringeren Maximalauftrieb, aber bei höheren Anstellwinkeln keinen Auftriebsabfall. Im dynamischen Verhalten waren die Tuberkel in bestimmten Situationen wirksamer, insbesondere bei großen Momenten in der Rollbewegung und niedrigen maximalen Flossenwinkeln. Es wurde festgestellt, dass die Verwendung von Tuberkeln bei Flossenstabilisatoren in bestimmten Situationen Vorteile bietet, und es besteht Potenzial für weitere Verbesserungen durch unterschiedliche Tuberkelgeometrien.

3.3. RUMPF (MANÖVRIEREN)

Durch die gezielte Beeinflussung der Strömungsablösung am Rumpf können Manövrierbewegungen präziser gesteuert und optimiert werden. Dies ermöglicht eine verbesserte Wendigkeit und Effizienz bei Hafenanmanövern und engen Kurvenfahrten. Die Strömungskontrolle wurde auch auf den Rumpf angewendet, um das Manövrieren zu optimieren.

Durch gezielte Aktuation konnten asymmetrische Strömungsmuster erzeugt werden, die das Manövrieren erleichtern und die Kursstabilität verbessern. Für den Anwendungsfall Manövrieren wurde ein kleines, schnelles und wendiges Mehrzweckschiff ausgewählt. Als Zielfunktion wurde eine Verbesserung der Querkräfte im Hinterschiff gewählt, da das Schiff aufgrund seiner besonderen Form –keine scharfen Kanten im Hinterschiff- als eher Gier-Instabil anzusehen ist (siehe Abbildung 9).

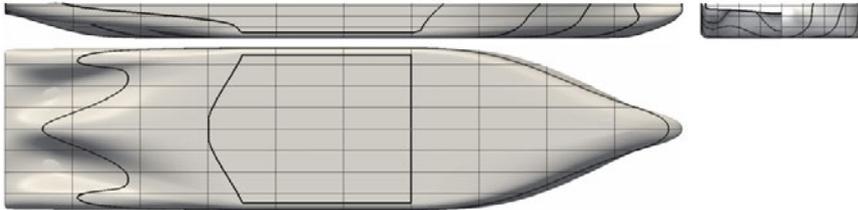


Abb. 9: Mehrzweckschiff, klein, schnell, wendig.

Zur Bestimmung der Sensitivitäten wurde das Schiff bei einem Driftwinkel von 2° berechnet und das resultierende Giermoment bewertet. Die adjungierte Bewertung erlaubt die Identifikation der Bereiche des Rumpfes, in denen die Integration von Jets einen positiven Einfluss auf die Querkraft des Hinterschiffes hat. Im Bereich des an Steuerbord liegenden achteren Überhangs zeigt sich ein ausgeprägter Bereich negativer Sensitivität (siehe Abbildung 10). Mit Blick auf die Verringerung der destabilisierenden Querkraft ist eine lokal negative Sensitivität mit einem empfohlenen, lokalen einblasenden Jet verbunden.

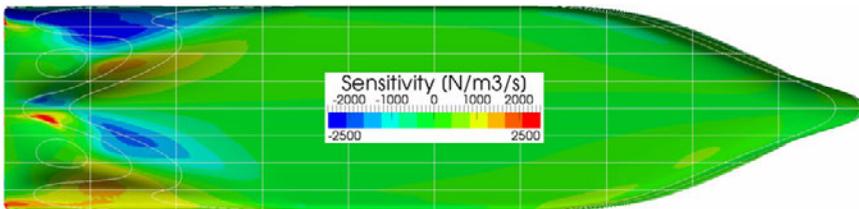


Abb. 10: Verteilung der Sensitivität beim Mehrzweckschiff

Für das bestehende Modell wurden entsprechende Schlepptank-Versuche durchgeführt und das Manövrierverhalten simuliert. Es wurde gezeigt, dass die aktive Strömungskontrolle das Manövrierverhalten positiv beeinflusst, jedoch waren die notwendigen Volumenströme vergleichsweise hoch, so dass es fraglich ist, ob die notwendige Pumpenleistung die in der Großausführung benötigt würde, den Aufwand rechtfertigt. Das Potenzial dieser Technologie für das Manövrieren zu erforschen.

3.4. HINTERSCHIFF (PROPULSION)

Zudem ist die Wirksamkeit fluidischer Aktuatoren für die Beeinflussung der Hinterschiffsumströmung untersucht werden. Als Testschiff wurde das bekannte Referenzschiff „Japan Bulk Carrier“ ausgewählt. Die völlige Schiffsform birgt die Gefahr der Ablösung im

Hinterschiff. Zur Zielfunktion wurde entsprechend eine Verbesserung des Widerstandes, sowie der Güte des Nachstroms gewählt. Da die angedachte Verbesserung im wesentliche auf die Vermeidung bzw. Reduzierung von Ablöse-Phänomenen zielt, wurden alle Berechnungen als Doppelkörperströmung ausgeführt.



Abb. 11: Seitenansicht des Japan Bulk Carrier (JBC)

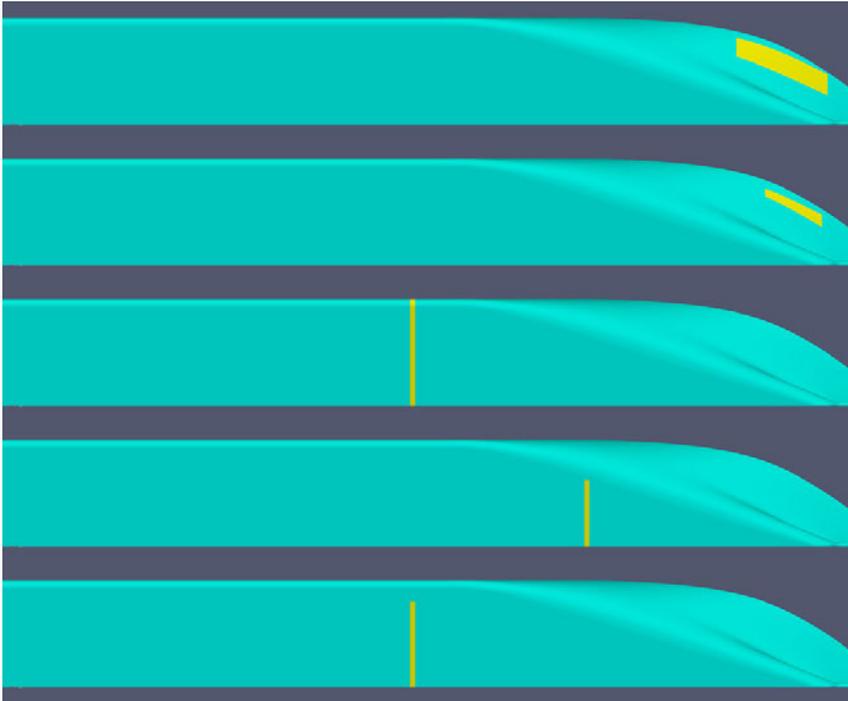


Abb. 12: Positionen der Aktuationsfelder am JBC

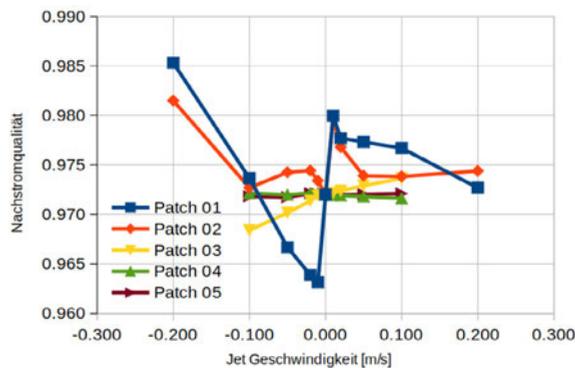
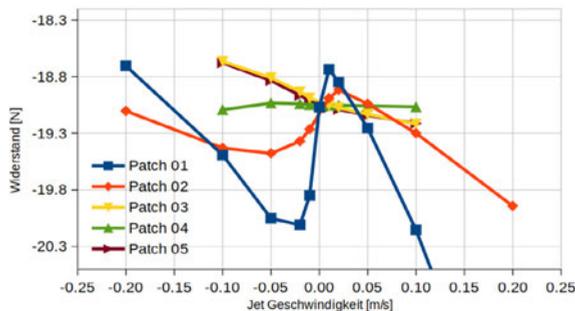
Mit Hilfe der adjungierten Methode wurden Bereiche ermittelt, in denen aktive Strömungskontrolle einen entsprechend positiven Einfluss auf die Zielfunktionen hat. Aus den Schlepptankversuchen ergab sich ein deutlicher Effekt auf die Propulsion mit aktiver Strömungskontrolle im Vergleich zum Verhalten ohne Strömungskontrolle.

Folgende Aufstellung liefert die geometrische Definition der einzelnen patches:

- Patch01: Alle Oberflächenelemente innerhalb y -Projektion des Bereiches definiert durch die Punkte: $(0.7, 0.0, 0.34)$, $(0.22, 0, 0.38)$, $(0.7, 0.0, 0.25)$, $(0.22, 0.0, 0.33)$
- Patch02: Alle Oberflächenelemente innerhalb y -Projektion des Bereiches definiert durch die Punkte: $(0.55, 0.0, 0.345)$, $(0.25, 0, 0.37)$, $(0.55, 0.0, 0.315)$, $(0.25, 0.0, 0.34)$

- > Patch03: Alle Oberflächenelemente für die gilt $2.395 < x \leq 2.42$
- > Patch04: Alle Oberflächenelemente für die gilt $1.475 < x \leq 1.5$ und $y \leq 0.35$
- > Patch05: Alle Oberflächenelemente für die gilt $2.395 < x \leq 2.42$ und $y \leq 0.45$

Die Betrachtung der Antwort des Gesamtwiderstandes zeigt, dass ein Einblasen für patch01 und patch02 bei kleinen Jet-Geschwindigkeiten wie erwartet auf einen zunehmend erhöhten Widerstand führt. Für Jet-Geschwindigkeiten größer (im Betrag) als -0.05m/s ist eine Verringerung des Widerstandes zu beobachten. Generell zeigt die Antwort der Zielfunktion für verschiedene Beträge der Jet-Geschwindigkeit eine stark nicht-lineare Charakteristik. Da die adjungierte Sensitivität nur für infinitesimale Jet-Geschwindigkeiten gilt kann diese Feststellung bzgl. der Robustheit nicht aus der adjungierten Analyse abgeleitet werden. Patch03 und patch05 zeigen übereinstimmend eine robuste Antwort der Zielfunktion. Eine zunehmende (negative) Jet-Geschwindigkeit führt auf eine monotone Reduktion des Gesamtwiderstandes. Für die betrachteten Jet-Konfigurationen wird eine Reduktion von bis zu 2% erreicht (für eine Jet-Geschwindigkeit von -0.10m/s).



oben: Widerstandskraft über Jet Geschwindigkeit für die unterschiedlichen Patches am Rumpf.
 unten: Nachstromqualität über Jet Geschwindigkeit für die unterschiedlichen Patches am Rumpf.

Zu beachten ist, dass die Qualität des Nachstromfeldes in der Propellerscheibe ausgewertet wird. Da zur Modellierung realer Betriebsbedingungen mit aktiver Propulsion gerechnet

wird, ergibt sich ein direkter Einfluss des Propellermodells auf die Nachstromqualität. Im direkten Einflussbereich des mittels eines bodyforce Ansatzes modellierten Propellers dominiert der vom Propeller eingebrachte Impuls die Geschwindigkeitsverteilung und überstrahlt die Qualität der Zuströmung. Zudem führt ein durch aktive Strömungskontrolle veränderter Schiffswiderstand auf einen veränderten Propulsionspunkt des Propellers, dessen angepasster Impuls-Eintrag sofort von der Zielfunktion Nachstromqualität erfasst wird. Gleichzeitig ist das Propellermodell nicht Teil des verwendeten adjungierten Modells, so dass diese Rückkopplung nicht im Zuge der adjungierten Analyse antizipiert wird.

In der Zusammenschau ergibt sich, dass eine Positionierung von fluidischen Aktuatoren im Bereich des Patches patch05 einen monotonen, positiven Einfluss auf den Schiffswiderstand hat. Die Zielfunktion „Nachstromqualität“ reagiert nahezu invariant auf die im Bereich von patch05 positionierten Aktuatoren. Gleichzeitig bietet sich der Bereich des patch05 im technischen Sinne für die Integration an: Im Modell ist an dieser Stelle eine Trennstelle vorhanden. In der Großausführung liegt diese Position ausreichend weit vor dem Maschinenraumfrontschott, so dass bei einer möglichen Integration keine Kollision mit maschinenbaulichen Komponenten zu erwarten ist.

3.5. PROPELLER

Im Rahmen des Projekts wurde zunächst untersucht, in welchen Betriebszuständen eine Ablösung am Propellerprofil erwartet werden kann. Dies wurde anhand der 2D-Profil Theorie für Massengutschiffe analysiert. Anschließend wurden mit RANSE-Methoden die Auftriebsbeiwerte charakteristischer Propellerprofile bei variierendem Anstellwinkel ermittelt. Die kritischen Anstellwinkel in Abhängigkeit von Profildicke und -Wölbung sind in Abbildung 13 dargestellt.

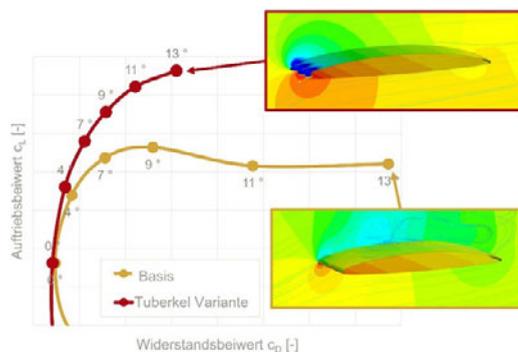


Abb. 13: Verhältnis von Auftriebs- zu Widerstandsbeiwert eines ausgewählten Propellerprofils mit und ohne Vorderkantenmodifikation.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde ein Verfahren entwickelt, um den effektiven Anstellwinkel des Blattschnittprofils unter Berücksichtigung von Propulsionsparametern zu bestimmen. Dadurch konnten mögliche Ablösungsbereiche für verschiedene Betriebszustände identifiziert und die Anforderungen an die Kantenmodifikation festgelegt werden.

Trotz dieser Vorbereitungen ergaben numerische Simulationen (Abbildung 14), dass die Vorderkantenmodifikation des Propellers keine signifikanten Änderungen in der Propellerkennlinie bewirkte. Die Strömung wurde detailliert untersucht und zeigte, dass der Propeller bei niedrigen Fortschrittsgraden die Strömung ansaugt und den angenommenen hohen Anstellwinkel nicht erreicht.

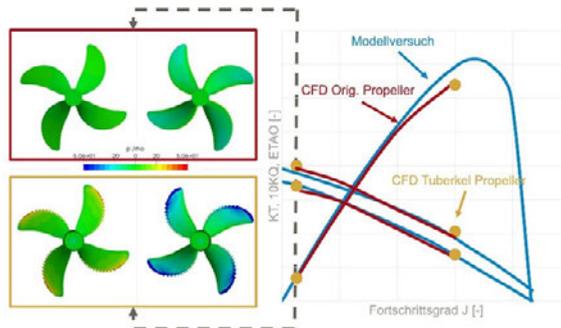


Abb. 14: Ergebnisse der transienten RANSE Freifahrtsrechnungen für einen Propeller mit und ohne Vorderkantenmodifikation

Es wird ein ursprünglicher Propellerentwurf mit einer Tuberkelvariante verglichen, um die Gesamtpropulsion zu bewerten. Die Kavitationsversuche (Abbildung 15) zeigten keine signifikanten Veränderungen in der Kavitationserscheinung, jedoch führte die Vorderkantenmodifikation zu geringeren Druckimpulsen auf die Schiffsaußenhaut aufgrund einer Reduzierung der Blattfrequenzen.



Abb. 15: Mit CFD berechnete Kavitation am Propeller ohne (links) und mit (rechts) Vorderkantenmodifikation.

Die Ergebnisse wurden in Zusammenarbeit mit dem Partner Dezibel Engineering und der MMG bewertet, und eine Tuberkelmodifikation wurde für einen Containerschiffspropeller abgeleitet. Anschließend wurden vergleichende Propulsionstests bei 5 Knoten durchgeführt.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Die Anwendungsfälle der Ablösekontrolle im Rahmen des SAMSON Projekts haben innovative Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienz, Manövrierfähigkeit und Leistungsfähigkeit maritimer Systeme aufgezeigt.

Im Anwendungsfall Ruder konnte die aktive Strömungskontrolle mit oszillierenden Jets als äußerst effektiv demonstriert werden. Die Implementierung von passiver Strömungskontrolle mit Tuberkeln in Rudern erwies sich hingegen als wenig sinnvoll, da dies zu einem erhöhten Widerstand führte, ohne einen signifikanten Anstieg des Auftriebs zu bieten. Die aktive Strömungskontroll-Technologie erfordert weitere Forschung und Entwicklung, um das volle Energieeinsparpotenzial auszuschöpfen, wie es in den Samson CFD-Simulationen angedeutet wurde. Bei der Anwendung von Tuberkeln auf Flossenstabilisatoren erwies sich die passive Strömungskontrolltechnologie als geeignet bei kleinen Anstellwinkeln und großen Momenten. In anderen Situationen waren keine Vorteile erkennbar. Aktive Strömungskontrolle im Anwendungsfall Schiffsrumpf zeigt vielversprechende Ergebnisse. In diesem Bereich wurden Versuche zur Optimierung der Manövrierfähigkeit durchgeführt. Des Weiteren wurden Untersuchungen mit aktiver Strömungskontrolle im Hinterschiffsbereich durchgeführt um positive Einflüsse in Folge der Aktuation auf die Propulsion zu untersuchen. Beide Anwendungsfälle bedürfen weitergehender Untersuchungen mit antreibenden Propellern, um die Gesamtheit der wirksamen Effekte abzubilden. Als letzter Anwendungsfall wurde in Samson die Wirksamkeit passiver Strömungskontrolle auf den Schiffspropeller untersucht. Aufgrund der verhältnismäßig kleinen Anstellwinkel im Betrieb von Schiffspropellern befinden sich die Tuberkel-Propeller in einem nicht-vorteilhaften Arbeitsbereich.

Insgesamt führte diese umfassende Zusammenarbeit mit allen Partnern des Konsortiums zu wichtigen Erkenntnissen darüber, wie aktive und passive Strömungsbeeinflussung in verschiedenen maritimen Anwendungen eingesetzt werden können, um die Leistungsfähigkeit zu erhöhen.

DEEPCOLUTION –

DEEPC3000 – ENTWICKLUNG UND ERSTER EINSATZ EINES BETONDRUCKGEHÄUSES FÜR MEERESTIEFEN BIS 3.000 M

AUTOREN

DR.-ING. MARCUS HERING	BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND -PRÜFUNG
DR.-ING. SEBASTIAN WILHELM	IBB INGENIEURBÜRO BAUSTATIK BAUTECHNIK WILHELM & ZOBEL PARTG MBB
DR. RER. NAT. FRANK WENZHÖFER LENNARD FROMMHOLD	ALFRED-WEGENER-INSTITUT HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR POLAR- UND MEERESFORSCHUNG
HEINRICH WASEMANN MARTIN BERGHOLZ	SUDHOLT-WASEMANN GMBH SUDHOLT-WASEMANN GMBH
DIPL.-ING. ELISABETH SCHÜTZE	CARBOCON GMBH
DR.-ING. JULIANE WAGNER	CARBOCON GMBH
PROF. DR.-ING. ALEXANDER SCHUMANN	CARBOCON GMBH
DR. ING. BIRGIT BECKMANN	TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN
PROF. DR.-ING. DR.-ING. E.H. MANFRED CURBACH	TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

1. EINLEITUNG

Das Ziel des Projekts DeepCsolution, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des „Maritimen Forschungsprogramms“, war die Entwicklung großformatiger Druckgehäuse aus Beton für den Einsatz in Wassertiefen bis 6.000 m, um die primären Anwendungsfelder – Meeresforschung und Tiefseebergbau – nahezu vollständig abzudecken. Die möglichen Anwendungen von Druckgehäusen bis 6.000 m Tiefe sind vielfältig, da es sich bei Druckgehäusen um eine Art Schlüsselement der Meerestechnik handelt. Als Ergebnis sollte ein Technologie-demonstrator mit integrierter Energieversorgung entwickelt werden, der universell für verschiedene Einsatzgebiete verwendet werden kann.

Ist die Verwendung von Beton bzw. ultrahochfestem Beton (engl.: ultra-high performance concrete, kurz: UHPC) anstelle von Titan oder seewasserbeständigen Edelstählen bei Einsätzen in der Tiefsee eine gute Idee? Im folgenden Beitrag soll gezeigt werden, dass diese Frage durchaus mit ja beantwortet werden kann. Hierfür sind jedoch einige Erläuterungen notwendig, um die Vorteile von UHPC für diesen speziellen Anwendungsfall zu verstehen.

1.1 Stand des Wissens und der Technik

Druckgehäuse aus UHPC für die Tiefseeforschung sind seit vielen Jahren ein Forschungsthema am Institut für Massivbau (IMB) an der Technischen Universität Dresden. Ausgehend von der Erkenntnis, dass für solche Druckgehäuse bereits verschiedenste Materialien und Materialkombinationen je nach erforderlicher Einsatzlänge und -tiefe eingesetzt werden, unter anderem Polyvinylchlorid (PVC), rostfreier Stahl, Aluminium, Titan und Keramik, entstand die Idee, Druckgehäuse aus UHPC zu fertigen. Im Rahmen der Helmholtz-Allianz "Robotische Exploration unter extremen Bedingungen - ROBEX" wurde diese Idee erstmalig umgesetzt [1], [2]. Der Entwurf des kleinmaßstäblichen Druckgehäuses aus UHPC, welches im Rahmen von ROBEX realisiert wurde, ist in Abb. 1 dargestellt.

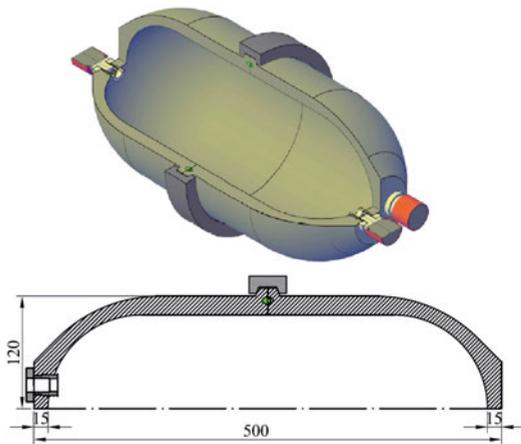


Abb. 1: Entwurf eines UHPC-Druckgehäuses im kleinen Maßstab für 3.000 m Betriebstiefe im Rahmen des ROBEX-Projekts; Bild: S. Wilhelm [2]

Doch was ist eigentlich unter dem Begriff UHPC zu verstehen und warum ist er für diese Anwendung geeignet? UHPC ist ein Hochleistungsbeton, der eine sehr hohe Druckfestigkeit aufweist. Wie konventioneller Beton kann UHPC in Formen gegossen werden, was eine anwendungsoptimierte Formgebung ohne zerspannende Arbeiten ermöglicht. Lediglich der Schalungsbau ist wie bei konventionellem Beton notwendig. Größter wirtschaftlicher Vorteil dieses Herstellungsverfahrens – die Schalungen können problemlos mehrfach wiederverwendet werden. Allerdings ist bei der Verwendung von UHPC auch zu beachten, dass, wie bei gewöhnlichem Beton, die Zugfestigkeit des Materials nur ein Bruchteil der Druckfestigkeit beträgt. Das Nichtbeachten dieser Eigenschaft führt unweigerlich zum Scheitern des Entwurfs und bildet somit einen neuralgischen Punkt bei der Arbeit mit Beton bzw. UHPC.

Da in den Meeren ein mit zunehmender Tiefe steigender hydrostatischer Druck vorherrscht, kann die Druckfestigkeit des Betons bestmöglich ausgenutzt werden. Die besonderen Belastungsbedingungen ermöglichten einen materialgerechten Entwurf des Druckgehäuses, bei dem nahezu ausschließlich Druckspannungen im Bauteil auftraten.

Zugspannungen wurden im Rahmen des Entwurfs des Druckgehäuses im Projekt ROBEX so weit wie möglich minimiert bzw. vermieden. Unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen konnte ein Druckgehäuse mit Einsatziefen bis zu 3.000 m entwickelt werden, das die Leistungsfähigkeit des UHPC voll ausnutzt, [2]–[6].

In den bisher durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass ein solches kleinmaßstäbliches UHPC-Druckgehäuse unter Laborbedingungen und unter den realen Bedingungen in der Tiefsee des arktischen Ozeans bestehen kann. Im Rahmen des ROBEX-Projekts konnte neben der reinen Funktionalität des Druckgehäuses auch gezeigt werden, dass eine Bereitstellung von elektrischer Energie auf dem Meeresboden durch in dem Druckgehäuse befindliche Speichermedien möglich ist. Eine Skalierung und damit Vergrößerung des Nutzvolumens des UHPC-Druckgehäuses erfolgte erst in den letzten Jahren im Rahmen des (Nachfolge-)Projekts DeepCsolution, welches Kernpunkt dieses Beitrags ist.

1.2 Zweck des UHPC-Druckgehäuses – DeepC3000

Wenn es um die Tiefsee als Einsatzort geht, sind die extremen Druckverhältnisse am Meeresboden eine offensichtliche Herausforderung, die es zu lösen gilt. Wie jedoch bereits beschrieben, eignet sich ein UHPC hierfür sehr gut. Ein weiterer Punkt, welcher besonders beachtet werden muss, ist der korrosive Angriff des Meerwassers. Derzeit wird dieses Problem durch die Herstellung von Druckgehäusen aus seewasserbeständigen Metallen wie rostfreiem Stahl, Aluminium oder sogar Titan gelöst. Diese Materialien sind jedoch sehr teuer, und insbesondere Titan ist äußerst schwierig zu verarbeiten. Des Weiteren besteht das Problem, dass die für die Produktion benötigten Halbzeuge nur in begrenzten Größenbereichen verfügbar sind. Dies schränkt die Größe der derzeit herstellbaren Druckgehäuse immens ein und macht diese sehr kostenintensiv [2].

Die Größe des herzustellenden Druckgehäuses hängt in erster Linie von der Größe der verfügbaren Schalung ab. Das Problem nicht verfügbarer Halbfertigprodukte besteht also nicht. Gleichzeitig gibt es keine Probleme mit Korrosion im Seewasser, da Beton inert ist und das Druckgehäuse keine Stahlbewehrung aufweist. Die neu entwickelten Druckgehäuse sollen als Speicherraum für Batterien dienen. Diese sollen die für die Tiefsee-Exploration durch stationäre Sensoren oder durch ferngesteuerte bzw. selbständig operierende Explorationsfahrzeuge benötigte Energie liefern und damit den Handlungsspielraum eines der Projektpartner, des Alfred-Wegener-Instituts (AWI), deutlich erweitern. Denn die Druckhüllen aus UHPC ermöglichen es, deutlich mehr Nutzvolumen bereitzustellen als herkömmliche Druckgehäuse.

Neben dem großen Innenraum gibt es noch einen weiteren wichtigen Vorteil: Die nicht-metallische Hülle könnte für neue großflächige und empfindliche Sensoren in der Tiefseeforschung sehr hilfreich sein. Bisher waren diese auf die Abmessungen herkömmlicher Gehäuse beschränkt.

2. DER ENTWURF DES DRUCKGEHÄUSES

Im Projekt DeepCsolution wurden die Druckgehäuse aufgrund der vorhandenen Testkapazität auf einen Außendurchmesser von 750 mm und eine Länge von 1.500 mm hochskaliert. Diese Abmessungen reichen aus, um deutlich mehr Batterien aufzunehmen als zuvor, so dass deutlich größere Energiemengen am Meeresgrund zur Verfügung stehen. Durch die Begrenzung auf die beschriebenen Außenmaße können Vorversuche an der Universität Rostock, wo sich der derzeit größte Druckbehälter Deutschlands befindet [7], zur Überprüfung der Belastbarkeit und Dichtheit durchgeführt werden.

Als Dichtungs- bzw. Verschlussystem für die Gehäuse wurden je nach Anwendungsszenario zwei Systeme entwickelt. Die erste Variante, mit der Bezeichnung DeepC3000-F, ist ein fest verklebtes Einweggehäuse. Der Vorteil des Verzichts auf metallische Zerspangenteile ist die quasi größenunabhängige Skalierbarkeit und die wirtschaftliche Fertigung ohne zeit- und kostenintensive CNC-Bearbeitung, da letztendlich Beton auf Beton geklebt wird. Für die zweite Variante wurde ein axiales Dichtungssystem entwickelt, das die Wiederverwendung der Gehäuse ermöglicht.

Für das Dichtungssystem können je nach Anforderung an die Lebensdauer und damit an die Korrosionsbeständigkeit seewasserbeständige Aluminium- (DeepC3000-Al-1.0) oder Titankomponenten (DeepC3000-Ti-1.0) verwendet werden. Die Dicke des Dichtungssystems wurde auf maximal 25 mm minimiert, um die für die Herstellung der Dichtungsringe erforderlichen Halbzeuge durch Heraustrennen aus Plattenhalbzeugen bis 30 mm gewinnen zu können. Die Notwendigkeit dazu ergibt sich aus den Schwierigkeiten, Rundstäbe mit einem Durchmesser von 800 mm und größer zu erhalten.

Die Form wurde einerseits hinsichtlich der Steifigkeit optimiert und andererseits, um den Schutz der sensiblen Oberfläche gegen unplanmäßige Zerstörung während des rauen Handlings an Bord nicht zu gefährden. Die Dichtflächen werden mit einer speziell entwickelten vierteiligen Schelle aus Kunststoff zusammengespannt. Über den sichtbaren Abstand der Dichtringe kann ein gleichmäßiges Anliegen des Dichtrings sichergestellt und kontrolliert werden.

Das verwendete Material im Projekt ist ein UHPC mit einer mittleren Druckfestigkeit von 160 N/mm^2 , der ca. 5-fachen Festigkeit von Normalbeton. Dieser Hochleistungsbeton hat neben der hohen Druckfestigkeit ein besonders dichtes Gefüge und einen minimalen Kapillarporengehalt. Dieser ermöglicht den hohen Widerstand des UHPC's gegen das Eindringen von Flüssigkeiten und Gasen.

Primäres Ziel der Optimierung war es, die Wandstärke des Gehäuses in Abhängigkeit von der Belastung und dem daraus resultierenden Spannungszustand in Deckel (Kugelschale) und Gehäuse (Zylinderschale) unter Berücksichtigung der mehrachsigen Druckfestigkeit von Beton zu optimieren, um ein möglichst geringes Eigengewicht bei hohem Nutzvolumen zu erreichen. Weiterhin waren Optimierungen im Bereich von Materialübergängen, wie sie bei den eingesetzten Metaldichtungen vorkommen, von hoher Rele-

vanz. Die materialbedingten Steifigkeitsunterschiede mussten dabei konstruktiv minimiert werden, um unplanmäßige lokale Zugspannungen zu vermeiden.

Die Dimensionierung des Druckgehäuses ist als zweistufiger Prozess aufgebaut. Basierend auf den Erfahrungen aus der bisherigen Forschung erfolgt die erste Vordimensionierung durch analytische Berechnung. Für die Bemessung wird dazu zunächst die modifizierte Gleichung der Theorie der dickwandigen Schale nach Lamé verwendet siehe Gleichung 1, wie sie von Wilhelm [2] entwickelt wurde.

$$p_{im,Zyl} = \frac{\alpha_{cc} \times \alpha_{pl} \times \alpha_{2A} \times f_c}{\gamma_c \times \gamma_Q} \times \left(-2 \times \left(\frac{t}{D} \right)^2 + 2 \times \frac{t}{D} \right) \quad (\text{Gl. 1})$$

Für die Auslegung der Druckgehäuse bis 6.000 m sind entsprechend ein Außendruck von bis zu 600 bar (6.000 m Wassertiefe) zu berücksichtigen. Für die Bemessung wird ein globaler Sicherheitsfaktor (SF) von 1,65 gewählt. Dieser setzt sich aus drei Teilsicherheitsfaktoren zusammen und vereinfacht die Bemessung bei der Geometrieoptimierung. Berücksichtigt wird dabei ein Dauerstandfaktor für langandauernde oder wiederholte Belastung ($\alpha_{cc} = 0,9$), ein Teilsicherheitsfaktor für den UHPC als Fertigteil ($\gamma_c = 1,35$) und ein Teilsicherheitsfaktor für die Belastung ($\gamma_Q = 1,10$), wenn keine Gefahr von Personenschäden besteht.

Ohne die Berücksichtigung der mehraxialen Festigkeit des Betons und des plastischen Umlagerungsvermögens bei dickwandigen Schalen wird der Implosionsdruck stark unterschätzt wie in Wilhelm [2] gezeigt. Daher wurden zwei weitere Faktoren α_{2A} und α_{pl} eingeführt, um das Versagen genauer beschreiben zu können. Der Faktor α_{2A} berücksichtigt dabei die mehraxiale Festigkeit und der Faktor α_{pl} das plastische Umlagerungsvermögen des Betons.

Für die Bemessung und Optimierung der Druckgehäuse ist eine Spannungsermittlung am Volumenmodell erforderlich, um Effekte der mehraxialen Festigkeit berücksichtigen zu können. Die vorhandene Rotations- und Spiegelsymmetrie des Gehäuses kann bei der Berechnung mittels Finite-Elemente-Methode (FEM) ausgenutzt werden. Für die Bewertung der Ergebnisse sind primär die Hauptspannungen σ_1 , σ_2 und σ_3 am Volumenelement von Bedeutung, siehe Abb. 2. Sowohl das Spannungsverhältnis (SPV) als auch die absoluten Werte von Spannungen und plastischen Dehnungen sind Kenngrößen für die Ermittlung des Versagens.

Für die Modellbildung wurde das Software-Plugin Grasshopper in Rhino verwendet, um parametrische Volumenmodelle zu erzeugen. Anschließend erfolgte die Bemessung und Auswertung der Spannungen mittels der Software DLUBAL RFEM.

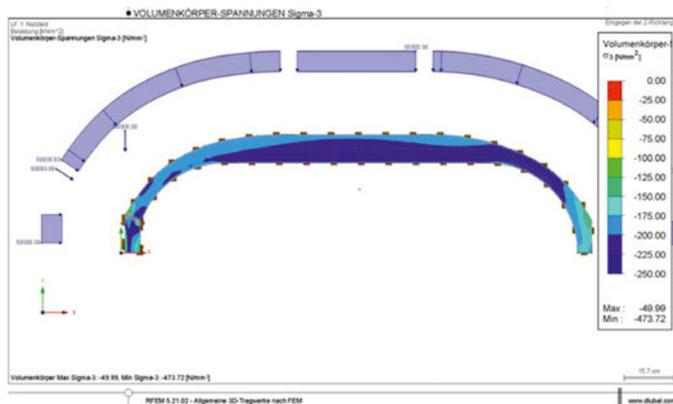


Abb. 2: Ergebnis der FE-Simulation, Verteilung der minimalen Hauptdruckspannung im Querschnitt;
Bild: S. Wilhelm

Für den Anschluss von externen Geräten wie Kameras oder Messgeräten wurde eine Schnittstelle mittels SubConn®-Steckern geschaffen. Diese werden in ein speziell entwickeltes Einbauteil im Beton eingedichtet und können somit wahlweise getauscht werden. Das Einbauteil im Beton wird je nach Anforderung in Edelstahl oder Titan gefertigt und wird nach dem Betonieren des Gehäuses mit einem Epoxidkleber eingeklebt.

Das Design des Druckgehäuses wurde von IBB entwickelt. Der Projektpartner sudholt-wasemann GmbH fertigte die Schalformen und goss den Beton. Die Anwendung der Messtechnik und die Fertigstellung der Druckgehäuse fand im Otto-Mohr-Labor des IMB der Technischen Universität Dresden statt.

3. BAUTEILVERSUCHE UNTER REALEN DRUCKBEDINGUNGEN

3.1 Einfache Belastung bis zu einer 1,1- und 1,4-fachen Sicherheit

Die bisher beschriebenen numerischen Berechnungen und Überlegungen können eine Bauteilprüfung unter realistischen Bedingungen nicht ersetzen. Schließlich muss nachgewiesen werden, dass das reale Druckgehäuse die, aus dem Wasserdruck resultierende Belastung, aushält und vor allem gegen eindringendes Wasser dicht ist. Aus diesem Grund wurden vier Exemplare des UHPC-Druckgehäuses DeepC3000 in Originalgröße im Drucktank des Lehrstuhls für Schifftechnik der Universität Rostock auf ihre strukturelle Integrität und Funktion geprüft, siehe [7], [8].

Drei der Druckgehäuse (DeepC3000-AI-1.0-002, DeepC3000-Ti-1.0-005 und DeepC3000-F-1.0-004) wurden bis zu einem Druck von 330 bar getestet, was dem Druck in einer Meerestiefe von 3.300 m entspricht. Des Weiteren wurde ein Gehäuse des Typs DeepC3000-F (DeepC3000-F-1.0-004) bis zu einem Druck von 420 bar geprüft, siehe Abb. 4. Der Druck wurde stufenweise aufgebracht. Zunächst wurde ein Druck von 50 bar aufgebracht und der Druck für 5 Minuten gehalten. Während der

Haltepause wurde beobachtet, ob ein Druckabfall im System auftrat. Dies hätte auf Undichtigkeiten im Druckgehäuse hingedeutet. Anschließend wurde der Druck in Schritten von 100 bar erhöht, jeweils unterbrochen durch Haltepausen von jeweils 5 min. Die Belastungsrate betrug 10 bar/min. Schließlich wurde der Druck auf das Zielniveau von 330 bzw. 420 bar erhöht, was einer Wassertiefe von 3.300 m bzw. 4.200 m entspricht, und ebenfalls 5 min gehalten. Anschließend wurde der Druck mit einer Geschwindigkeit von 10 bar/min wieder abgesenkt.

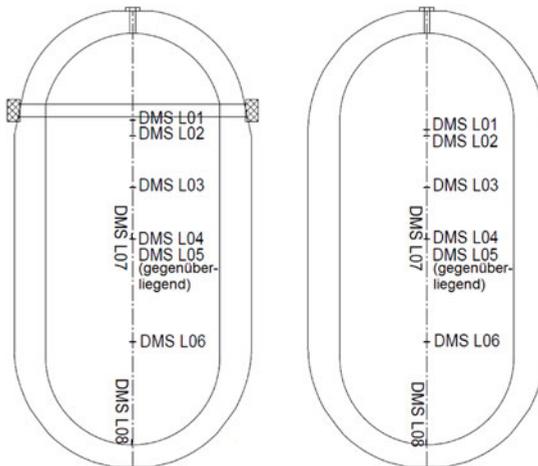
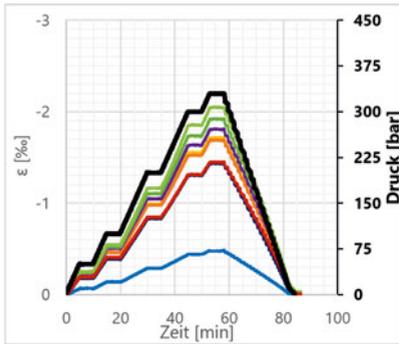


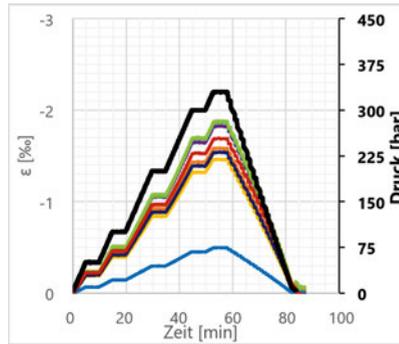
Abb. 3: Messstellenplan, links Druckgehäuse mit Dichtungssystem, rechts: fest verklebtes Druckgehäuse, Hering et al. [8]

Tab. 1: Übersicht der realmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen

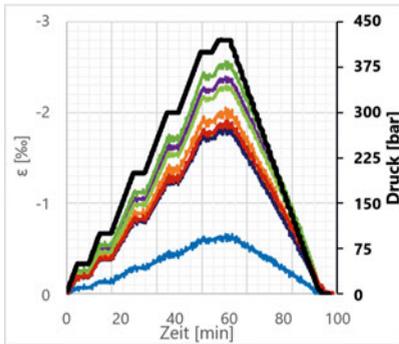
	Maximaler Druck	Dichtungssystem	Testablauf
DeepC3000-AI-1.0-002	330 bar	Seewasserbeständiges Aluminium-Dichtungssystem	1× Belastung bis zum 1,1-fachen Sicherheitsniveau 10× zyklische Belastung bis zum 1,1-fachen Sicherheitsniveau
DeepC3000-F-1.0-003	330 bar	feste Verklebung durch Epoxidharz	1× Belastung bis zum 1,1-fachen Sicherheitsniveau
DeepC3000-F-1.0-004	420 bar	feste Verklebung durch Epoxidharz	1× Belastung bis zum 1,4-fachen Sicherheitsniveau 10×zyklische Belastung bis zum 1,1-fachen Sicherheitsniveau
DeepC3000-F-1.0-005	330 bar	Titan-Dichtungssystem	1× Belastung bis zum 1,1-fachen Sicherheitsniveau



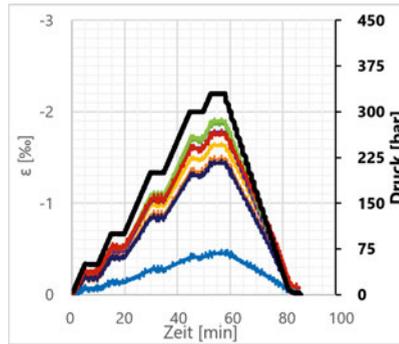
DeepC3000-AI-1.0-002



DeepC3000-F-1.0-003



DeepC3000-F-1.0-004



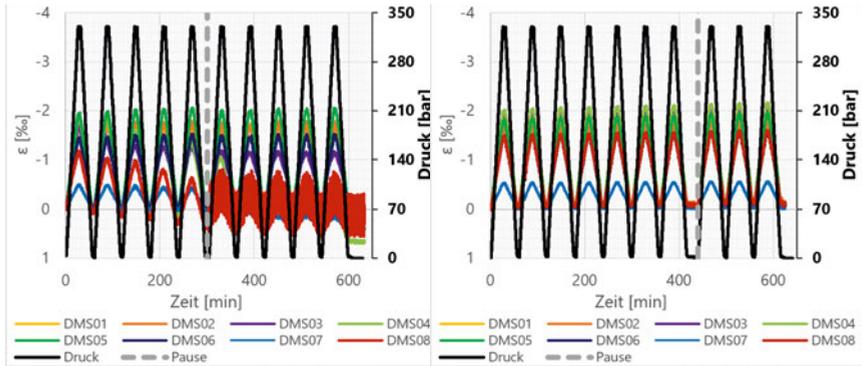
DeepC3000-F-1.0-005

Abb. 4: Durchgeführte Druckversuche, Druck-Zeit- und Dehnungs-Zeit-Diagramme, Hering et al. [8]

Zur Messung der infolge des aufgebrachtten hydrostatischen Drucks auftretenden Verformungen des Druckgehäuses wurden im Inneren der Druckgehäuse Dehnungsmessstreifen (DMS) appliziert. Die Positionen der DMS sind in Abb. 3 dargestellt. Die gesammelten Messdaten wurden zur Validierung des entwickelten Bemessungsmodells verwendet.

3.2 zyklische Belastung bei einer Sicherheit von 1,1

Nach der einmaligen Belastung mit einem Druck von 330 bar beim DeepC3000-AI-1.0-002 und 420 bar beim DeepC3000-F-1.0-004 wurden diese beiden Druckgehäuse einem zusätzlichen zyklischen Test unterzogen. Der Soll-Druck von 330 bar, der einer Tiefe von 3.300 m entspricht, wurde 10-mal aufgebracht, ohne dass das Druckgehäuse brach. Wie zuvor wurde der Druck mit 10 bar/min auf- und abgebaut. Diese Versuche zeigten, dass die Druckgehäuse auch mehrfach eingesetzt werden können. Die gesammelten Messdaten werden in Abb. 5 dargestellt.



DeepC3000-AI-1.0-002

DeepC3000-F-1.0-004

Abb. 5: Durchgeführte zyklische Druckversuche, Druck-Zeit- und Dehnungs-Zeit-Diagramme, Hering et al. [8]

4. ENTWURF DES LANDERS AUS CARBONBETON

Für den Transport des Druckgehäuses und die gezielte Platzierung von Messinstrumenten werden meist sogenannte „Lander“-Strukturen eingesetzt. Üblicherweise bestehen derartige Konstruktionen aus Edelstahl oder Titan. Um den bereits beschriebenen hohen Anforderungen an die Haltbarkeit in der Tiefseenumgebung gerecht zu werden, wurde im hier vorgestellten Forschungsprojekt eine dauerhaftere sowie kostengünstigere Variante des Landers in Form einer dünnwandigen Betonstruktur aus hochfestem Carbonbeton entwickelt (Abb. 6).

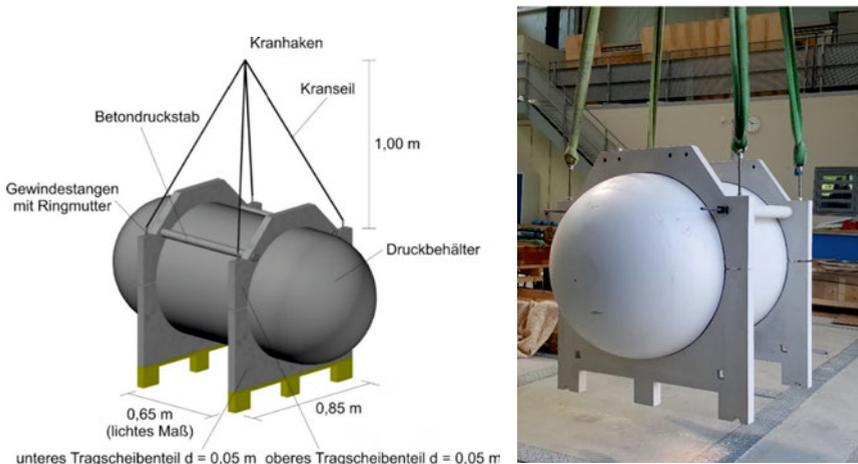


Abb. 6: Carbonbeton-Lander inklusive UHPC-Druckgehäuse (Bildrechte: CARBOCON GmbH)

Der entworfene Lander besteht aus zwei Stützplatten, welche jeweils aus zwei Einzelteilen zusammengesetzt sind, die mit Gewindestangen gegen das Druckgehäuse gespannt werden. Die Haken, über die die Gesamtkonstruktion mit einem Kran transportiert werden kann, sind ebenfalls an diesen Gewindestangen befestigt. Zur horizontalen Ver-

steifung der Struktur sind im oberen Bereich zwischen den Stützplatten zwei Druckstäbe vorgesehen. Die Form der Stützplatten ermöglicht es zudem, das gesamte System mit einem Gabelstapler oder einem Hubwagen zu transportieren.

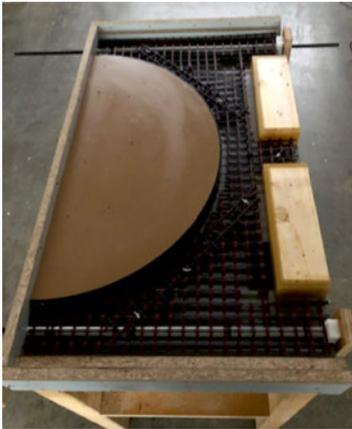


Abb. 7: Carbonbewehrung der Stützplatten vor der Betonage (Bildrechte: sudholt-wasemann GmbH)

Als Material wurde für den Lander ein hochfester Beton (engl: high-performance concrete, HPC) mit einer Druckfestigkeit von 120N/mm^2 und einem Größtkorn von 5 mm gewählt, der dem hydrostatischen Druck in einer Tiefe von 3.000 m standhält und eine hohe Dauerhaftigkeit aufweist. Dieser ist mit Carbongittern mit einer Gitterweite von ca. 25 mm und Carbonstäben mit einem Nenndurchmesser von 8,5 mm bewehrt. Die Bemessung des Landers erfolgte durch die CARBOCON. Detaillierte Informationen sind in Schütze et al. [9] enthalten.

Mit dieser Lander-Konstruktion wurde eine steife, leicht zu transportierende und im Vergleich zu anderen Landern (z.B. einem Titanrahmen) haltbarere sowie wirtschaftlichere Lösung entwickelt.

5. MÖGLICHE EINSATZSZENARIEN

Aufgrund stetig steigender Rohstoffpreise wird die Erschließung von Manganknollen- und Mangankrusten-Vorkommen, sulfidischen Erzschlammern, Massivsulfiden, Phosphorit- oder Diamant-Vorkommen durch Meeresbergbau zunehmend wirtschaftlich untersucht (Scholz [11]). Die notwendige Infrastruktur muss dafür teilweise neu entwickelt und entsprechend geschaffen werden. Die im Projekt entwickelten Druckgehäuse aus Beton können beispielsweise genutzt werden, um große Pufferspeicherlösungen für die Elektrifizierung von Rohstofffeldern, Maschinengehäuse für Pumpenanlagen, Offshore-Containments oder Anlagen zur Gewinnung und Verarbeitung von Mineralien und Bodenschätzen zu realisieren.

Neben den wirtschaftlichen Interessen sind diese Betongehäuse auch für wissenschaftliche Fragestellungen hoch interessant. So können mit den Betongehäusen z.B. große

Energiedepots für Langzeitmissionen im arktischen Raum unter Eis geschaffen werden, in denen keine regenerativen Energien wie Wellen- oder Sonnenenergie genutzt werden können. Eine weitere Anwendung sind der Aufbau großflächiger Forschungsnetzwerke, wie beispielsweise das Ocean Network Canada mit einer Vielzahl an einzelnen Stationen, den sogenannten „junction boxes“. Diese könnten, als geschlossene Gehäuse in Beton realisiert, für die erweiterte Energieversorgung und den Datentransfer von z. B. unbemannten Unterwasserfahrzeugen (engl.: autonomous underwater vehicle, AUV) oder ferngesteuerten Unterwasserfahrzeugen (engl.: remotely operated underwater vehicle, ROUV) genutzt werden. Damit wäre das Monitoring größerer Bereiche als bisher möglich, um die Meeresumwelt weiter erforschen und deren Schutz gewährleisten zu können. Auch die Anzahl und Leistungsfähigkeit an Energieverbrauchern (z. B. Kamerasysteme, Messtechnik etc.) als Nutzlast der AUVs kann mit der erweiterten Energieversorgung steigen, um ein detaillierteres und vollständigeres Monitoring gewährleisten zu können.

Durch den einfachen und individuellen Herstellungsprozess können sehr kundenspezifische Lösungen von Druckgehäusen realisiert werden. Vor allem große Druckgehäuse können einfach und kostengünstig produziert werden.

Die Stromversorgung von Tiefseeeinstrumenten ist bei aktuellen Anwendungen oft ein limitierender Faktor. Mit den neuen UHPC-Druckgehäusen können wesentlich größere Energiemengen gespeichert werden. Tab. 2 zeigt einige Beispiele für wiederaufladbare und nicht wiederaufladbare Batterien, die in dem DeepC3000-Druckgehäuse angeordnet sind, das für die hier vorgestellten Labortests und unsere Demonstrationsmission verwendet wurde, [9]. Mit hochenergetischen Li-Ionen-Batterien kann eine Gesamtkapazität von mehr als 78 kWh erreicht werden. Selbst mit wiederaufladbaren Batterien kann eine Gesamtkapazität von etwa 50 kWh garantiert werden. Dies ist einzigartig und eröffnet neue Möglichkeiten für sehr lange Missionen oder sehr energieaufwendige Anwendungen wie große Lichtquellen oder starke Motoren.

Tab. 2: Übersicht möglicher Batterietypen, Energiemengen und zugehöriger Nutzlasten für den Einsatz im DeepC3000

Batterietyp	Energiedichte [Wh/kg]	Anzahl der Zellen	Kapazität [kWh]	Masse [kg]
LSH20, Saft, 3.6 V, 13 Ah, 100 g	468	1678	78.5	168
LR20 Power, VARTA	182	1678	41.5	227
HR HiPower, 12 V, 85 Ah	60	16	16.3	272
BlackMax automotive EFB, 12 V, 90 Ah	51	16	17.3	336

6. LANGZEITMISSION

6.1 Ziel

Um die Möglichkeiten und den Einsatz des neuen UHPC-Druckgehäuses in maritimen Anwendungen zu demonstrieren, wurde ein System zur Langzeitverankerung entworfen (Abb. 8). Bei dieser Anwendung dient das Druckgehäuse als Energiespeicher für die angebrachte Nutzlast. Daher wurde das Druckgehäuse mit Lithiumbatterien (LSH 20, Saft) mit einer Gesamtkapazität von 8 kWh bei 33 V ausgestattet. Die Kameras sind so programmiert, dass sie ein Jahr lang jeden Tag Fotos und ein kurzes Video zur Überwachung des Meeresbodens aufnehmen.

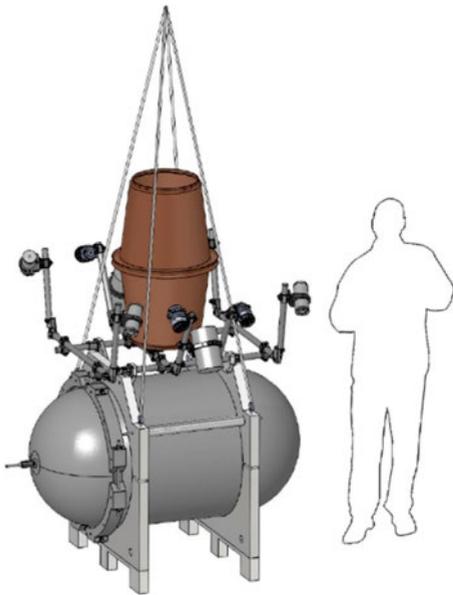


Abb. 8: DeepC3000 und Lander, Schütze et al. [9]; Bild: J. Lemburg, AWI

6.2 Vorbereitung der Langzeitmission

Die Handhabung des DeepC3000 in seiner finalen Position im Lander stellt an Land keine nennenswerten Probleme dar, da normalerweise ein Hallenkran zur Verfügung steht und kein Seegang das Handling erschwert.

Eine Handhabung des Deckels mit Muskelkraft wäre unter Zuhilfenahme mehrere Personen denkbar, allerdings verbieten die Gegebenheiten an Bord dieses Vorgehen. Für die Handhabung des DeepC3000 an Bord eines Schiffs musste eine Hilfskonstruktion entwickelt werden, die das sichere Arbeiten mit dem Druckgehäuse ermöglicht. Hierfür wurde ein aus Aluminiumschienen bestehendes Schienensystem entwickelt, das es ermöglicht, den DeepC3000 zu öffnen und den Deckel positionstreu in seiner Höhe zu fixieren bzw. zu verschieben, siehe Abb. 9.



Abb. 9: DeepC3000 im Lander mit Schienensystem im geöffneten Zustand; Bild: M. Hering

Parallel zu den Missionszielen des AWI sollte während der Langzeitmission die Gelegenheit genutzt werden, das Materialverhalten des eingesetzten UHPC unter Dauerbelastung zu untersuchen. Aus diesem Grund wurde zusätzlich zu der aus Batterien bestehenden Nutzlast noch ein Messsystem zur Erfassung der Betonverformung im Inneren des DeepC3000 installiert. Die finale Installation des Messsystems ist in Abb. 10 dargestellt.

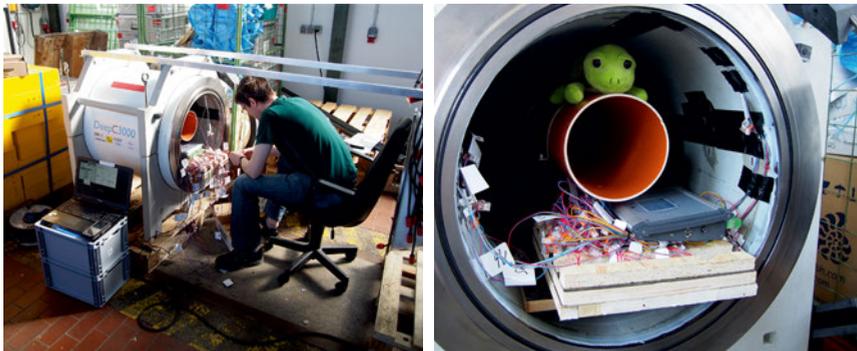


Abb. 10: DeepC3000 geöffnet, Installation der Messtechnik für die Langzeitmission; Bild links: M. Hering, Bild rechts: M. Findeisen

6.3 Aussetzen des Landers

Das gesamte Landersystem, bestehend aus UHPC-Druckgehäuse, Kameranutzlast und Verankerungsleine mit Auftriebs- und akustischem Auslösesystem, wurde während der Expedition MSM108 mit dem Forschungsschiff (engl.: research vessel, RV) Maria S Merian bei N 79° 01,971' E 004°19,371' in 2.509 m Wassertiefe ausgebracht

(Abb. 11). Während seines 12-monatigen Einsatzes versorgten die im Betonzylinder verstauten Batterien die vier Unterwasserkameras (zwei selbstgebaute PiCams [10] und zwei HD-Kameras (Blackmagic Micro Cinema, Blackmagic Design Lt, Port Melbourne, VIC, Australien)) und ihre vier LED-Leuchten mit Strom versorgen, um hochauflösende Zeitreihen des Meeresbodens zu liefern.



Abb. 11: Letzte Vorbereitungen und Aussetzen des DeepC3000 im Lander; Bilder: T. Soltwedel, AWI)

Das Batteriesystem des DeepC3000 ermöglicht es zum ersten Mal, dass mehrere Kamerasysteme gleichzeitig Bilder des Meeresbodens mit hoher zeitlicher Auflösung aufnehmen können. Drei der Kameras (zwei PiCams und eine HD-Kamera) sind auf ein 6-Stunden-Intervall (4 Bilder/Tag) eingestellt. Die zweite HD-Kamera ist auf ein 30-Minuten-Intervall (48 Bilder/Tag) eingestellt, um Bilder des Meeresbodens mit noch höherer zeitlicher Auflösung aufzunehmen. Zuvor konnten mit einer Kamera nur alle 12 Stunden Bilder aufgenommen werden. Die Bergung des Landers mit DeepC3000 war für den Sommer 2023 während der Expedition PS136 von RV Polarstern geplant. Allerdings konnte die Bergung durch die vorherrschende Eissituation nicht wie geplant durchgeführt werden.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem BMWK für die Förderung des Projekts „Druckgehäuse aus ultrahochfestem Beton für die Meerestechnik (DeepCsolution)“, Förderkennzeichen 03SX498.

LITERATUR

- [1] Homepage ROBEX-Allianz: www.robex-allianz.de, 01.03.2022.
- [2] Wilhelm, S.: Einsatz von UHPC-Druckgehäusen zum Schutz vor extremen Umgebungsbedingungen der Tiefsee. Dissertation, TU Dresden, published in: Publication series Konstruktiver Ingenieurbau Dresden kid, Issue 45, 268 S., 2018.
- [3] Wilhelm, S. und Curbach, M.: UHPC-Druckgehäuse für Anwendungen in der Tiefsee. *Beton- und Stahlbetonbau* 113 (2018), S. 414–421 – DOI: 10.1002/best.201800007.
- [4] Wilhelm, S. und Curbach, M.: Experimental and non-linear numerical analysis of underwater housings for the deep sea made of ultra-high performance concrete (UHPC). *Structural Concrete* 18 (2017) 1, S. 216– 224 – DOI: 10.1002/suco.201600018.
- [5] Wilhelm, S. und Curbach, M.: Sealing systems for low-cost and corrosionfree pressure housings made of ultra-high performance concrete (UHPC). In: MTS/IEEE (Hrsg.): Proc. of OCEANS'17, 19. –22.6.2017 at Aberdeen (GB), 2017, 4 S. (publ. on CD).
- [6] Wilhelm, S. und Curbach, M.: Development of underwater housings for the deep sea made of ultra-high performance concrete (UHPC) and long-term testing at the arctic sea. In: MTS/IEEE (Hrsg.): Proc. of OCEANS'16, 19. –23.9.2016 at Monterey (USA), 2016, 6 S. (publ. digitally on CD) – DOI: 10.1109/OCEANS.2016.7760999.
- [7] <https://www.lmt.uni-rostock.de/lehrstuhl/ausstattung/drucktank/>, 16.03.2022
- [8] Hering, M.; Wilhelm, S.; Curbach, M.; Wasemann, H.; Bergholz, M.; Wenzhöfer, F.; Frommhold, L.; Schütze, E. und Schumann, A.: DeepC3000 – large corrosion-free pressure housing made of ultra-high performance concrete (UHPC) for depths up to 3,000 m In: Proc. Of OCEANS'22, 17. –21.8.2022 at Hampton Roads (USA), 2022
- [9] Schütze, E.; Schumann, A.; Wenzhöfer, F.; Frommhold, L.; Wilhelm, S.; Hering, M. und Wasemann, H.: DeepC3000 – first deployment of a pressure housing made of UHPC for depths up to 3,000 m on a deep-sea mission using a carrier-frame made of carbon reinforced concrete. In: Proc. Of OCEANS'22, 17. –21.8.2022 at Hampton Roads (USA), 2022
- [10] Purser, A.; Hoge, U.; Lemburg, J.; Bodur, Y.; Schiller, E.; Ludszuweit, J.; Greinert, J.; Dreutter, S.; Dorschel, B.; Wenzhöfer, F.: PlasPI Marine Cameras: Open-source, affordable camera systems for time series marine studies. In *HardwareX*, vol. 7, 2020, e00102
- [11] Scholz, S.: Rohstoffversorgung durch Meeresbergbau. In: *Schiff und Hafen* 5 (2011), S. 72–76
- [12] Kuhn, T.; Rühlemann, C.; Wiedicke-Hombach, M.; Rutkowsky, J.; Wirth, H.-J. von; Koenig, D.; Kleinen, T.; Mathy, T.: Tiefseeförderung von Manganknollen. In: *Schiff und Hafen* 5 (2011)

B ZERO

ENTWICKLUNG DER WACHFREIEN SCHIFFSBRÜCKE

AUTOREN

PAUL KOCH	FHG CML
MANFRED CONSTAPEL	FHG CML
HANS-CHRISTOPH BURMEISTER	FHG CML

1. EINLEITUNG

Das hohe Sicherheitsbedürfnis in der Schifffahrt und die zunehmende Globalisierung erfordern, dass Prozesse an Bord eines Schiffes optimiert, digitalisiert und gleichzeitig kosteneffizient umgesetzt werden. Neben der Zunahme von Gefahrensituationen durch menschliches Versagen führen eine steigende Anzahl von Routinetätigkeiten und der Mangel an qualifiziertem Personal zu einem Bedarf an Systemen, die Teile der Aufgaben und Entscheidungen übernehmen und autonom ausführen. Dies bedingt die Entwicklung von Lösungen, welche die Vorteile der Automatisierung unter dem Aspekt der Sicherheit, Transparenz und Nachvollziehbarkeit umsetzen.

Das B ZERO-Projekt realisiert und integriert wesentliche Anforderungen der maritimen Industrie in ein Gesamtsystem für die wachfreie Schiffsbrücke. Dazu gehören neben einem System zur autonomen Navigation eines Schiffes (Abb. 1) auch die Erstellung eines digitalen Schiffstagebuchs und die zuverlässige Kommunikation von Information über den Zustand des Systems an das Schiffspersonal. Zielstellung von B ZERO ist der Betrieb einer wachfreien Schiffsbrücke über einen Zeitraum von bis zu acht Stunden.

Die Kernthemen des Projektes umfassen:

- › Anforderungsanalyse an ein autonomes Navigationssystem und die wachfreie Brücke
- › Entwicklung eines Sensorsystems zur Erstellung eines maschinellen Lagebildes
- › Implementierung von Algorithmen zur autonomen Navigation unter Berücksichtigung der Kollisionsverhütungsregeln (KVR)
- › Implementierung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle für die Durchführung der Wachübergabe und Wachübernahme an nautische Offiziere sowie Darstellung des maschinellen Lagebildes
- › Entwicklung eines digitalen Schiffstagebuchs zur automatisierten Aufzeichnung und Benachrichtigung relevanter Parameter und Zustände für die Transparenz und Nachvollziehbarkeit des Systems und zur Steigerung der Akzeptanz durch die Nutzer

- › Risikoabschätzung des Betriebs eines autonomen Navigationssystems und Identifizierung von Anpassungen an bestehende Gesetzgebungen und Regularien zur dauerhaften Inbetriebnahme gleichartiger Systeme



Abb. 1: Blick von der Brücke des Testschiffes "Henrika Schulte".

2. KONZEPTIONIERUNG UND ANWENDUNGSDOMÄNE

Das Konzept für das Gesamtsystem beinhaltet die autonome Navigation, die Sensordaten-Akquisition, die Schaffung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI) zur Interaktion mit den nautischen Offizieren und einer Lösung zur automatisierten Erfassung und Darstellung von Ereignissen und Entscheidungen in einem digitalen Schiffstagebuch. Die Anforderungen für ein solches Gesamtsystem erfordern die Berücksichtigung des Informationsbedarfs für eine sichere Schiffsführung und der spezifischen Anwendungsbereiche, in denen das System eingesetzt werden soll.

2.1 Technisches Konzept

Das System soll als sogenannter „Autonomous Onboard Controller“ entsprechend der Definition der ISO 23860 agieren, d. h. als ein Automationssystem an Bord des Schiffs (Internationale Organisation für Normung (ISO), 2022). Ziel ist es, die Schiffsbrücke ohne menschliche Hilfe so zu betreiben, dass eine sichere Navigation über einen Zeitraum von bis zu acht Stunden möglich ist. Im Kern ist das Gesamtsystem verteilt auf mehrere Komponenten, welche Daten (zumeist NMEA- oder ITU-spezifizierte Daten) in einem Netzwerk austauschen. Das Schiff bzw. die Sensorplattform verfügt über bereits installierte (bord-interne) und hinzugefügte bzw. nach-installierte (bord-externe) Sensorik. Die Sensordaten-Akquisition bedient den Informationsbedarf des autonomen Naviga-

tionssystems zur Wahrnehmung von Objekten bzw. Verkehrsteilnehmern, aber auch zum Zustand des eigenen Schiffes. Das autonome Navigationssystem ist dabei die zentrale Komponente zur Umsetzung der Entscheidungsfindung und Erstellung eines umfassenden maschinellen Lagebildes. In bestimmten Fällen kann auch der Mensch (Wachoffizier) als externer Sensor fungieren, d. h. er kann Eingaben in das Gesamtsystem tätigen, aber auch Informationen aus dem System gezielt abfragen.

Im Rahmen des Projektes wurde von sicherheitsrelevanten Eingriffen in die bestehenden Bordsysteme aus operativen und regulatorischen Gründen verzichtet. Der Regelkreis, sprich die Weitergabe und Umsetzung von Fahrt- und Ruderbefehlen für das Manövrieren des Schiffes, wurde durch visuelle Prompts über die HMI an den Rudergänger umgesetzt. Für den Test des Gesamtsystems und zur Evaluierung des technischen Konzeptes wurden Schiffsführungssimulatoren eingesetzt, welche es erlaubten, einen (simulierten) Regelkreis zwischen Entscheidungsfindung und Schiffsteuerung zu schließen.

2.2 Aufbau eines maschinellen Lagebildes

Ein wichtiger Teil des Gesamtsystems ist die Akquisition von Daten unterschiedlicher Sensoren zur Erstellung eines maschinellen Lagebildes. Dieses Lagebild dient als Entscheidungsgrundlage für das autonome Navigationssystem und enthält Informationen wie den Typ, die Distanz, die relative Peilung und die Position von Objekten, die das Schiff umgeben (Burmeister, Constapel, Uge, & Jahn, 2020). Zusätzlich wird das maschinelle Lagebild für eine Kontextualisierung der Objekte in der Umgebung mit Informationen aus einer elektronischen Seekarte angereichert. Dafür wurde ein ENC-Server entwickelt, welcher auf Anfrage entsprechende Objekt- oder Umgebungsinformationen aus einer elektronischen Seekarte an das autonome Navigationssystem weitergibt.

Zur Stützung der Wahrnehmung der unmittelbaren Umgebung des Schiffes wurden Kameras und Nahfeldradare an Bord des Testschiffes installiert. Diese zusätzlichen Sensoren ermöglichen eine Anreicherung der Telemetriedaten vom AIS-Empfänger und den Sensordaten des Radargerätes. Schwer zu detektierende Objekte wie Bojen, Treibgut oder kleinere Schiffe können so zuverlässiger erkannt und in das maschinelle Lagebild einbezogen werden.

2.3 Spezifizierung der Anwendungsdomäne

Der zulässige Einsatzbereich (Anwendungsdomäne) des autonomen Navigationssystems ist definiert durch entsprechende Betriebsparameter, welche die Bedingungen beschreiben, in denen das System bei In-Situ-Testkampagnen an Bord des Testschiffes, aber auch im Simulator zur Evaluation, sicher eingesetzt werden kann. Die Werte und Bereiche der Betriebsparameter sind in der Operational Design Domain (ODD) festgehalten (Ugé & Hochgeschurz, 2021)¹. Die ODD legt außerdem kritische Bedingungen fest, unter denen eine Übergabe zwischen dem autonomen Navigationssystem und dem Wachoffizier zwingend erfolgen muss, da sich das Navigationssystem außerhalb der sicheren Betriebsparameter ("außerhalb der ODD") befindet (Tab. 1).

¹Anmerkung: Nach ISO 23860 mittlerweile als „Operational Envelope“ bezeichnet

Tab. 1: Übersicht ODD Parameter B ZERO

ODD-Parameter	kritische Bedingung	notwendige Reaktion
Rollperiode	Rollperiode (in s, zu bestimmen) & Rollperiode/Pitchperiode=0,5 ±0,15	Evaluation
Rollwinkel	≥ 10°	Evaluation
Pitchperiode	Pitchperiode (in s, zu bestimmen) & Pitchperiode/Rollperiode=0,5 ±0,15	Evaluation
Pitchwinkel	≥ 25°	Evaluation
Geschwindigkeit	≤ Anteil (zu bestimmen) der geplanten Geschwindigkeit	Evaluation
UKC	≤ Tiefgang oder ≤ 50m ≤ 0,7× Karten-UKC	Wachübernahme Evaluation
Zeit zu „nicht autonomiefähigem Gebiet“	≤ 12 Minuten	Wachübernahme
XTD	≥ sichere XTD (zu bestimmen)	Evaluation
Verkehrsdichte	hohe Verkehrsdichte (zu bestimmen)	Wachübernahme
CPA & TCPA	Ziel ist ausweichpflichtig & CPA ≤ 1,5-2 Seemeilen & TCPA ≤ 15-18 Minuten	Evaluation
	Eigenschiff ist ausweichpflichtig & CPA ≤ 1,5-2 Seemeilen & TCPA ≤ 12 Minuten	Evaluation
	Eigenschiff ist ausweichpflichtig & CPA ≤ 1,5-2 Seemeilen & TCPA ≤ 15-18 Minuten & Kursabweichung ≥ 90°	Wachübernahme
Kursabweichung	Eigenschiff ist ausweichpflichtig & CPA ≤ 1,5-2 Seemeilen & TCPA ≤ 15-18 Minuten & Kursabweichung ≥ 90°	Wachübernahme
Verlust eines Radarziels	Radius: ≤ 12 Seemeilen & AIS-Daten zum Ziel sind nicht verfügbar	Evaluation
Windstärke	≥ 8 Beaufort	Wachübernahme
Sichtweite	≤ 3 Seemeilen	Evaluation
Treibende Objekte	≥ 1 treibendes Objekt	Evaluation

Für den Übergang zwischen autonomen und normalen Betriebsmodus, d.h. eine mit einem Wachoffizier besetzte Brücke, wurden die Prozesse Wachübernahme und Evaluation definiert. Die Wachübernahme ist eine standardisierte Übergabe des autonomen Navigationssystems an einen Wachoffizier ähnlich einer Wachübergabe zwischen zwei Wachoffizieren. Die Evaluation zeigt an, dass das autonome Navigationssystem die aktuelle Situation nicht vollständig einschätzen kann und eine Beurteilung der aktuellen

Lage durch einen Menschen erforderlich ist. Nach der durchgeführten Evaluation der Situation durch einen Wachoffizier oder den Kapitän kann die autonome Navigation fortgesetzt oder beendet werden.

Die Festlegung der Schwellwerte für die ODD wurde gemeinsam mit den Partnern mittels Fragebögen und Workshops durchgeführt. Während der Systementwicklung und den Tests im Schiffsführungssimulator wurden diese Schwellwerte im Laufe des Projekts iterativ angepasst.

3. ENTWICKLUNGSARBEITEN

Zur Umsetzung des technischen Konzeptes und der Einbeziehung der spezifizierten ODD-Parameter wird im nachfolgenden auf notwendige Entwicklungsarbeiten zur Implementierung des autonomen Navigationssystems und Umsetzung der HMI eingegangen.

3.1 Autonomes Navigationssystem

Ein entscheidender Schritt bei der Implementierung und Inbetriebnahme einer wachfreien Brücke bestand in der Entwicklung des autonomen Navigationssystems. Dieses System muss in der Lage sein, alle navigationsrelevanten Aufgaben des Wachoffiziers während seiner Abwesenheit von der Brücke übernehmen zu können. Zu diesen Aufgaben zählen unter anderem auch der Aufbau eines umfassenden Situationsbewusstseins und die Anwendung aller geltenden Navigationsregeln gemäß Kollisionsverhütungsregeln (KVR) sowie die Überwachung wichtiger Parameter über den Betriebszustand des Schiffes.

Aufgrund der hohen Heterogenität der zur Verfügung stehenden Sensordaten war es im Rahmen des Projektes notwendig, neuartige Lösungen zur Kontextualisierung unterschiedlichster Sensordaten zu entwickeln. Zur Umsetzung dieser Anforderung wurde eine interne Abstraktionsschicht entwickelt, die alle Sensordaten in eine einheitliche Struktur überführt und somit ein systemweites Verständnis der verschiedenen Datenquellen schafft. Diese Abstraktionsschicht repräsentiert das maschinelle Lagebild des autonomen Navigationssystems und ermöglicht es, relevante Informationen wie Position, Orientierung und Lage des eigenen Schiffes und der umgebenden Schiffe in einen Kontext zu setzen und somit eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Die Kontextualisierung von Sensordaten ist in der autonomen Navigation kritisch für die korrekte Anwendung der KVR, sowie eine zuverlässige Bewertung der Verkehrssituation.

Das autonome Navigationssystem (Abb. 2) setzt sich aus dem maschinellen Lagebild (Object Tracker), dem Situationsbewusstsein (Situational Awareness) und der Pfadplanung und Track-Rückführung (Collision Avoidance) zusammen. Informationen und Daten über den Betriebszustand des Schiffes werden über externe Schnittstellen (z. B. NMEA) von dem autonomen Navigationssystem abgegriffen und über das HMI visualisiert.

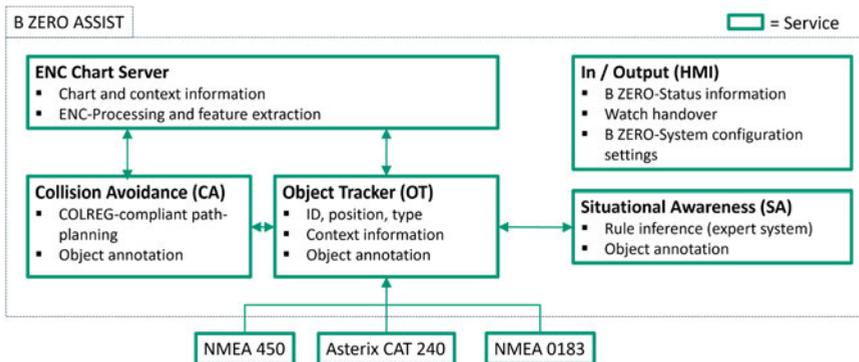


Abb. 2: Übersicht Software Komponenten des autonomen Navigationssystems (B ZERO Assist)

Eine wesentliche Herausforderung in der Entwicklung des autonomen Navigationssystem war die Integration der KVR in das Situationsbewusstsein. Die Komplexität bestand hier in der Formalisierung und Transformation der ursprünglich für die menschliche Interpretation entwickelten Regeln in eine für das autonome Navigationssystem verständliche Form. Für diese Transformation gibt es derzeit noch keine international harmonisierte Methode (Constapel & Burmeister, Autonomous Collision Avoidance at Sea: A Survey, 2021). Die Umsetzung erfolgte unter Nutzung eines regelbasierten Ansatzes (Constapel, Koch, & Burmeister, 2022), bei welchem die KVR mithilfe spezieller Operationalisierungen in eine maschinenlesbare Form überführt werden kann. Abb. 3 zeigt, wie eine Überholsituation auf Basis von situationsbezogenen Aussagen erkannt und in die autonome Navigation integriert werden kann. Situationsbezogene Aussagen beschreiben dabei unter anderem die relative Position, Geschwindigkeit und Bewegungsverhalten von Objekten im maschinellen Lagebild untereinander. In der Abbildung wird veranschaulicht, wie diese Aussagen die Bewegung zwischen dem eigenen Schiff (grün) und einem anderen Schiff (rot) beschreiben. Sie geben beispielsweise an, ob sich die Schiffe voneinander entfernen oder sich annähern, und ob sich das andere Schiff im Achtersektor des eigenen Schiffes befindet. Dies wird durch Begriffe wie "fellow" (Schiff und Eigenschiff entfernen sich oder nähern sich nicht) und "astern" (Schiff befindet sich im Achtersektor) dargestellt.

Die Überholsituation wird in diesem Beispiel durch die Verkettung des Achtersektors (Astern) und der Negation (gekennzeichnet durch das Ausrufezeichen) der Aussagen "Outbound" und "Leaving" beschrieben. Das andere Schiff entfernt sich in diesem Beispiel nicht und kommt auch nicht näher, so dass es nach KVR als Überholendes Fahrzeug ("overtaking") angesehen werden kann. Für das autonome Navigationssystem bedeutet dies, dass es zum Kurs- und Fahrt-Halter wird und Änderungen am Kurs oder der Geschwindigkeit vermeiden sollte.

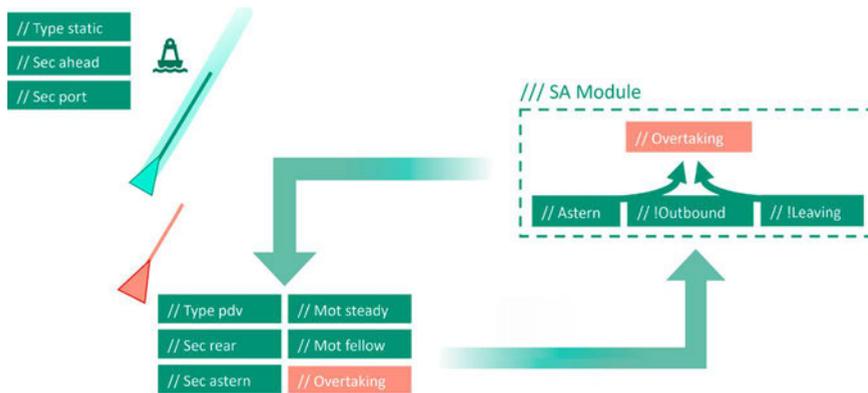


Abb. 3: Anwendung der operationalisierten KVR

3.2 Mensch-Maschine-Schnittstelle

Die Zielstellung der Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI) besteht in der Kommunikation über den aktuellen Zustand des Gesamtsystems und der damit verbundenen Stärkung des Vertrauens des wachhabenden Offiziers und Kapitäns zum System. Neben den ODD-Parametern visualisiert und steuert das HMI zusätzlich notwendige Prozesse wie die Wachübergabe zwischen dem autonomen Navigationssystem und dem Wachoffizier, und zeigt dem Rudergänger notwendige Kurs- und Fahrtänderungen an.

Die dargestellte Benutzeroberfläche (Abb. 4) zeigt einen Ausschnitt aus dem HMI in welchem ein Ruderkommando an den Rudergänger übergeben wird. Es ist zu erkennen, dass auf der Karte im rechten Bildbereich eine Kreuzungssituation nach KVR-Regel 15 (Kreuzende Kurse) erkannt und vom autonomen Navigationssystem verarbeitet wurde. Die Reaktion und das Schließen des Regelkreises erfolgten durch einen visuellen Prompt an den Rudergänger mit einer genauen Beschreibung des durchzuführenden Manövers. Die Beschreibung erklärt dem Rudergänger, seinen Kurs nach Steuerbord anzupassen (rote Kurslinie in der Karte), um der Ausweichpflicht gegenüber dem kurshaltenden Fahrzeug (blau markiert) nachzukommen.

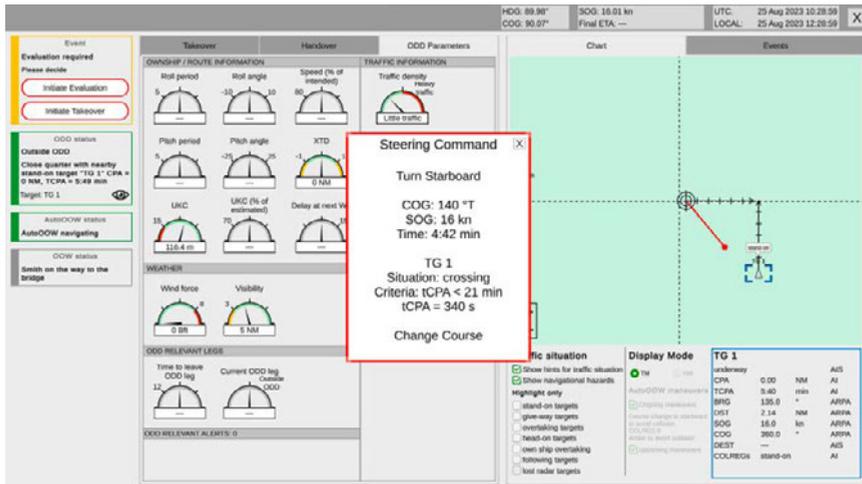


Abb. 4: HMI-Visualisierung mit dargestellter Kursänderung als Reaktion auf eine Ausweichpflicht des Testschiffes

4. VERSUCHSTRÄGER HENRIKA SCHULTE

Um das Gesamtsystem an Bord eines Schiffes testen zu können wurde im Rahmen des Projektes ein Containerschiff der Reederei Bernhard Schulte Shipmanagement (BSM) mit dem entwickelten System ausgerüstet. Die Installationen umfassten neben einer umfangreichen Anpassung der Kommunikationsinfrastruktur auch die Installation von Sensoren, Netzwerktechnik und Rechnern, die für den Betrieb des Gesamtsystems notwendig sind.

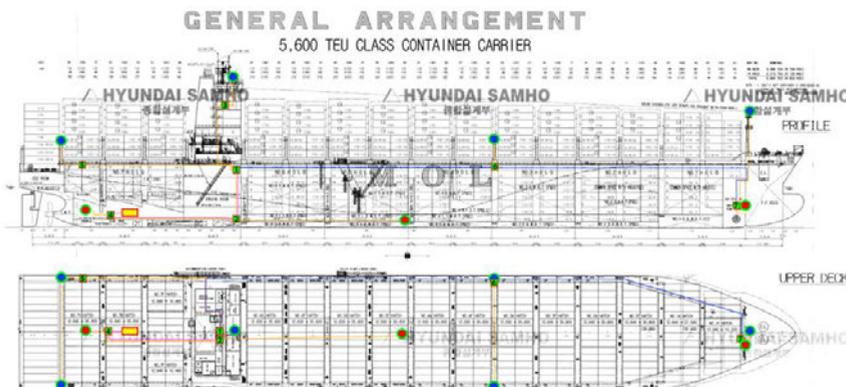


Abb. 5: Übersicht Anpassungen technische Infrastruktur auf Testschiff "Henrika Schulte"

Die technische Umsetzung an Bord des Testschiffes Henrika Schulte erfolgte in verschiedenen Phasen verteilt über den Projektzeitraum. Zur Bereitstellung der notwendigen Infrastruktur mussten zusätzliche Glasfaser und Ethernet Kabel an Bord des Testschiffes verlegt werden. Diese sind notwendig um Sensoren mit einem hohen Durchsatz, wie Kameras zur optischen Überwachung des Umfeldes, im gesamten Schiff zugänglich zu machen.

Eine in Abb. 5 dargestellte schiffbauliche Zeichnung zeigt die zusätzlich installierte Kommunikationsinfrastruktur hervorgehoben durch farbige Linien. Die farbigen Kreise markieren verschiedene Endpunkte an Bord des Testschiffes in Form von Sensoren, Netzwerktechnik oder Computern.

Durch die umfangreichen Anpassungen an der Kommunikationsinfrastruktur konnte die über das Schiff verteilte Hardware in Form von Sensoren, Netzwerktechnik und Rechnern in einem gemeinsamen Bordnetzwerk zugänglich gemacht und von allen Komponenten des Gesamtsystems genutzt werden.

Die wichtigsten Installationen an Bord des Testschiffes umfassen unter anderem:

- › Radar- und Kamerasysteme zur verbesserten Identifikation von Schiffen und Hindernissen
- › Sensoren zur Ermittlung von Maschinenparametern und Erfassung der Schwimmlage
- › Server und Netzwerk-Switches zur Aufzeichnung relevanter Parameter und Zustände
- › Verschiedene Rechner zum Betrieb des autonomen Navigationssystems und des HMI

Ein Blockdiagramm der installierten Hardware (siehe Abb. 6) zeigt die Aufteilung über verschiedene Bereiche des Schiffes. Als zentraler Ort im Schiff wurde ein Raum zur Installation elektrischer Hardware (Elec. Equip. Room) ausgewählt an dem neben notwendigen Servern für das digitale Schiffstagebuch und der bord-externen Sensorik auch die Rechner zur Datenaufzeichnung und Bereitstellung des autonomen Navigationssystem durch das Fraunhofer CML zu finden sind.

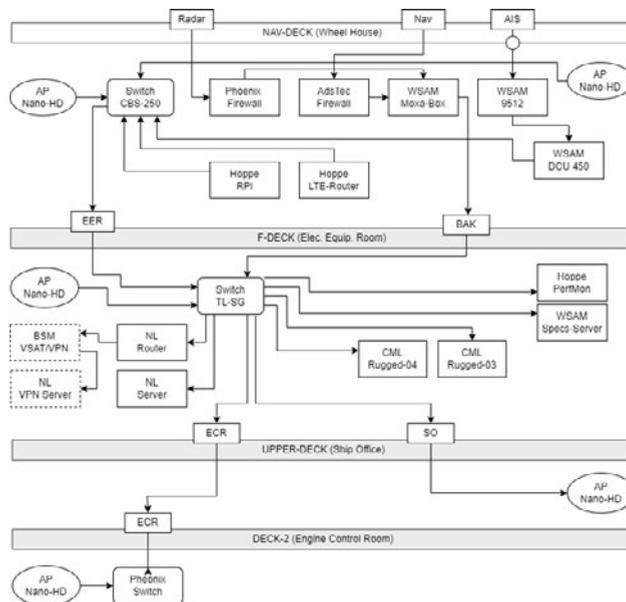


Abb. 6: B ZERO Gesamtsystem an Bord des Testschiffes „Henrika Schulte“

5. SYSTEMTESTS UND EVALUATION

Um beurteilen zu können, ob die Projektziele und der wachfreie Betrieb des Schiffes erfolgreich erreicht werden konnten, wurden während der Entwicklung und zum Abschluss des Projektes kontinuierlich Auswertungen und Tests der einzelnen Komponenten und des Gesamtsystems durchgeführt. Zur Evaluierung des technischen Konzeptes und zur Bewertung der Funktionsfähigkeit wurden die Komponenten sowohl im Simulationslabor als auch an Bord des Testschiffes in verschiedenen Entwicklungsstufen installiert.

5.1 Simulationstestläufe

Wichtige Komponenten wie das autonome Navigationssystem konnten mit Hilfe eines Schiffsführungssimulators am Fraunhofer CML getestet und mögliche Fehler in den Algorithmen frühzeitig erkannt werden. Mit den Simulationstestläufen wurden zwei wesentliche Ziele verfolgt: Das Verhalten des autonomen Navigationssystems in verschiedenen Verkehrssituationen und Umweltbedingungen zu untersuchen und das HMI bei der Bedienung durch nautische Offiziere vor der In-Situ Testkampagne zu evaluieren. Darüber hinaus konnten realitätsnahe Datenprodukte für die Entwicklung aller Komponenten vorab simuliert und beispielsweise für die Integration des autonomen Navigationssystems in das Gesamtsystem genutzt werden.

5.2 In-Situ Testkampagne

Neben den simulativ generierten Daten und deren Nutzung für die Softwareentwicklung wurde bereits frühzeitig im Projekt mit der Installation und dem Test der notwendigen Infrastruktur an Bord des Testschiffes begonnen. Insbesondere für die Integration des digitalen Logbuchs sowie für erste Tests des autonomen Navigationssystems wurden verschiedene Hafenaufenthalte und kurze Fahrten zwischen den Häfen genutzt. So konnten die Datenströme kontinuierlich ausgewertet und die erfolgreiche Integration der Sensoren sowie die Funktionalität des autonomen Navigationssystems getestet werden.

Für die In-situ-Tests wurde das Gesamtsystem unter verschiedenen Bedingungen während der Fahrt zwischen den Häfen von den Offizieren an Bord des Testschiffes aktiv genutzt. Zielstellung dieser Tests war es die korrekte Funktion der implementierten Algorithmen und des HMI zu testen sowie die tatsächliche Interaktion des Gesamtsystems mit dem Wachoffizier zu evaluieren. Dazu wurden verschiedene Szenarien, die bereits im Simulator getestet wurden, an Bord wiederholt, um die korrekte Funktion des Gesamtsystems unter realen Bedingungen beurteilen zu können.

5.3 Evaluation der Ergebnisse

Die Erfassung des Situationsbewusstseins unter Nutzung der HMI wurde, während der Simulator Untersuchungen mit Hilfe der Methode „Situation Awareness Global Assessment Technique“ (SAGAT) durchgeführt und diente als Grundlage für die Bewertung der tatsächlichen Nutzbarkeit des Gesamtsystems. Im Rahmen von Simulator Tests wurde die Interaktion von fünf Personen mit der HMI untersucht, an Bord des Testschiffes haben drei Offiziere an den Tests teilnehmen können. Die Ergebnisse aus den Simulator Tests haben

bei den Versuchspersonen gezeigt, dass das HMI zu einem besseren Situationsverständnis beiträgt. Das HMI konnte die Offiziere erfolgreich dabei unterstützen, sich nach einer Wachübernahme vom autonomen Betrieb schnell in der aktuellen Verkehrssituation zurechtzufinden oder eine Wachübergabe an das autonome Navigationssystem selbstständig durchzuführen.

Das Gesamtsystem war in der Lage, verschiedene KVR-Situationen richtig zu identifizieren und dem Schiffsführer entsprechende Entscheidungen zu kommunizieren. Diese Informationen wurden vom Brückenpersonal während der Versuche gut verstanden und konnten entsprechend umgesetzt werden. Der Einsatz des Systems erwies sich somit im Rahmen der ODD als sicher und zuverlässig.

Die Evaluation konnte zudem zeigen, dass das Gesamtsystem bei den Testpersonen auf eine gute Akzeptanz gestoßen ist, was als Indiz dafür gewertet werden kann, dass ein Einsatz über den Prototypenstatus hinaus realistisch erscheint.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Projekts B ZERO wurden wichtige Schritte zur Entwicklung und Implementierung einer wachfreien Schiffsbrücke unternommen und erfolgreich umgesetzt.

Die Ziele des Projekts umfassten ein breites Spektrum, von der technologischen Umsetzung eines autonomen Navigationssystems bis hin zur Mensch-Maschine-Interaktion. Die Entwicklung einer wachfreien Schiffsbrücke mit dem Potenzial zur autonomen Navigation adressiert dabei nicht nur die Dringlichkeit, menschliche Fehler durch eine Reduktion der ständigen Arbeitsbelastung zu minimieren, sondern eröffnet auch Perspektiven für eine optimierte Prozessgestaltung und Effizienzsteigerung in der Schifffahrt sowie die Möglichkeit einer attraktiveren Arbeitsplatzgestaltung.

Die technologischen Komponenten von B ZERO - das Sensorsystem, das autonome Navigationssystem und die Mensch-Maschine-Schnittstelle - sind Schlüsselkomponenten, um einen sicheren und effizienten Betrieb zu gewährleisten. Die Fähigkeit des autonomen Navigationssystems Daten aus verschiedenen Quellen zu verarbeiten und zu verstehen, bildet die Grundlage für eine zuverlässige Entscheidungsfindung. Die Mensch-Maschine-Schnittstelle ist dabei ein kritisches Bindeglied, das eine transparente Kommunikation und Übergabe zwischen dem autonomen Navigationssystem und dem Wachoffizier ermöglicht.

Die Implementierung des Gesamtsystems wurde durch umfangreiche Simulationstests und in-situ Testkampagnen auf einem realen Schiff validiert. Diese Tests zeigten nicht nur die technische Robustheit des Gesamtsystems, sondern gaben auch Einblicke in die praktische Anwendung und Interaktion der Offiziere mit dem System. Die Auswertung der Testergebnisse zeigte eine verbesserte Situationswahrnehmung der Offiziere durch

das bereitgestellte HMI sowie eine erfolgreiche Umsetzung der KVR durch das autonome Navigationssystem.

Im wissenschaftlichen Kontext unterstreicht das Projekt B ZERO, dass die Integration von Automatisierung und Autonomisierung in die maritime Navigation technisch machbar ist. Es bildet die Grundlage für zukünftige Entwicklungen im Bereich der autonomen Schifffahrt und zeigt, wie Technologie und menschliches Handeln zusammenwirken können, um eine sichere und effiziente Schifffahrt zu ermöglichen.

ZUSAMMENARBEIT IM KONSORTIUM

Die Entwicklungen im Projekt B ZERO wurden von einem Konsortium bestehend aus der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. als Projektkoordinator, dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), der Bernhard Schulte GmbH & Co KG (BSM), der Wärsilä Voyage Germany GmbH (WV), der NautilusLog GmbH (NL) und der Hoppe Marine GmbH (HM) durchgeführt. Alle Entwicklungen für das autonome Navigationssystem und die Konzeption der HMI wurden von CML und FKIE ausgeführt. Recherche und Konzeption von Vorschriften für die Zulassung autonomer Navigationssystemen erfolgte durch das BSH. Die Bereitstellung des Testschiffes und operative Unterstützung der In-Situ-Testkampagne erfolgte durch BSM, die Implementierung des digitalen Logbuchs und des Bordnetzes durch NL. Integration und Bereitstellung der bord-externen Sensorik wurden durch WV und HM durchgeführt.

LITERATUR

- [1] Burmeister, H.-C., Constapel, M., Uge, C., & Jahn, C. (2020). From Sensors to MASS: Digital Representation of the Perceived Environment enabling Ship Navigation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- [2] Constapel, M., & Burmeister, H.-C. (2021). Autonomous Collision Avoidance at Sea: A Survey. *Frontiers in Robotics and AI*.
- [3] Constapel, M., Koch, P., & Burmeister, H.-C. (2022). On the implementation of a rule-based system to perform assessment of COLREGs onboard maritime autonomous surface ships. *Journal of Physics: Conference Series*.
- [4] Internationale Organisation für Normung (ISO). (05 2022). Technische Spezifikation (TS). Ships and marine technology - Vocabulary related to autonomous ship systems.
- [5] Ugé, C., & Hochgeschurz, S. (2021). Learning to Swim - How Operational Design Parameters Determine the Grade of Autonomy of Ships. *TransNav*.

SMART.START

SMARTE INBETRIEBNAHME

AUTOREN

TIM JANSEN	TECHNISCHE UNIVERSITÄT HAMBURG – IPMT, HAMBURG
NINA KÖSTER	TECHNISCHE UNIVERSITÄT HAMBURG – IPMT, HAMBURG
PROF. HERMANN LÖDDING	TECHNISCHE UNIVERSITÄT HAMBURG – IPMT, HAMBURG
HENRIKE LOOP	FR. LÜRSEN WERFT GMBH & CO. KG, BREMEN
JAN WALLNER	ABEKING & RASMUSSEN SCHIFFS- UND YACHTWERFT SE, LEMWERDER
ANDRE EBERLEI	MEYER WERFT GMBH & CO. KG, PAPANBURG
THOMAS PAWLIK	MEYER WERFT GMBH & CO. KG, PAPANBURG

1. EINLEITUNG UND MOTIVATION

Die Inbetriebnahme von Teil- und Gesamtsystemen gehört zu den Schlüsselprozessen in der maritimen Unikatfertigung.

Im Rahmen der Erstinbetriebnahme eines Neubauprojekts werden die verbauten Systeme erstmalig im Zusammenspiel eingesetzt. Die Komplexität der verbauten Systeme und die Vielfalt der technischen Anlagen von verschiedensten Unterlieferanten stellen die Werften dabei vor erhebliche Herausforderungen.

Ein effizienter Inbetriebnahmeprozess sowie ein möglichst frühzeitiges Erkennen von Bauabweichungen sind entscheidend für die termingerechte Ablieferung und die Einhaltung des Qualitätsstandards. Die sorgfältige Prüfung und Vorstellung der Systemfähigkeiten sowie die präzise Dokumentation eventueller Abweichungen von den spezifizierten Leistungsdaten bei der finalen Abnahme ermöglicht erst die Übergabe des Produkts an den Kunden. Für das übergeordnete Ziel eines lebensphasenübergreifenden digitalen Zwillings werden hier die erforderlichen Daten gesammelt und verfügbar gemacht.

Heutige Best-Practice-Lösungen für die Inbetriebnahme beruhen auf datenbankgestützten Checklisten, die während der Inbetriebnahme mit einem Notebook oder auf einem Tablet-PC ausgefüllt werden. Sie sind ein wesentlicher Fortschritt gegenüber den papiergebundenen Erfassungsformularen früherer Zeiten, jedoch weiterhin mit erheblichen Nachteilen verbunden:

- › Die manuelle Vorbereitung der Prüfdokumente nutzt das Automatisierungspotential nicht aus, da bereits vorliegende Informationen vom System nicht selbstständig verarbeitet werden.

- › Die Inbetriebnahmeplanung erfolgt weitgehend manuell und ist dadurch zeitaufwändig.
- › Die erfassten Werte werden nicht in einem durchgängigen System dokumentiert und sind daher für nachgelagerte Prozesse nicht optimal verfügbar.
- › Die Kommunikation von Bauabweichungen ist nicht ausreichend transparent.

Die Industriepartner Fr. Lürssen Werft, Meyer Werft und Abeking & Rasmussen, gemeinsam mit der TU Hamburg haben mit diesem Projekt den Fortschritt der Digitalisierung vorangetrieben und die Potentiale im Bereich der Inbetriebnahme ausgelotet. Hierzu wurde ein Technologiedemonstrator entwickelt an dem die identifizierten Potentiale im betrieblichen Ablauf getestet und bewertet werden konnten.

Die Ergebnisse des Projekts smart.START haben einen weiteren Digitalisierungs- und Automatisierungsschritt in der schiffbaulichen Inbetriebnahme angestoßen. Durch die Entwicklung eines unterstützenden Assistenzsystems werden den Mitarbeitern Werkzeuge an die Hand gegeben, die nicht nur den Zeitaufwand reduzieren, sondern auch die allgemeine Prozessqualität erhöhen. Hierzu werden geläufige Fehlerquellen in der innerbetrieblichen Kommunikation beseitigt und die Informationsgewinnung aus der Inbetriebnahme strukturiert. Planerische und erstellende Prozesse wurden auf Ihr Potential hin untersucht, durch die Analyse vorliegender Daten automatisiert zu werden.

2. ANFORDERUNGEN AN EIN DIGITALE ASSISTENZSYSTEM FÜR DIE INBETRIEBNAHME

Das im Forschungsprojekt smart.START entwickelte digitale Assistenzsystem soll den maritimen Inbetriebnahmeprozess ganzheitlich abbilden. Dazu gehört neben der Erstellung von Prüfspezifikationen sowie der Planung und Steuerung von Inbetriebnahmen auch die Durchführung der Prüfungen an sich. Um einen möglichst generischen Ansatz für die Entwicklung des digitalen Assistenzsystems zu verfolgen und damit eine werft-unabhängige Lösung zu entwickeln, wurden zunächst Anforderungen definiert. Durch eine Analyse der Inbetriebnahmeprozesse von drei Werften konnten u.a. die folgenden Anforderungen abgeleitet werden:

- › Dem digitalen Assistenzsystem soll ein digitaler Zwilling für den Inbetriebnahmeprozess zugrunde liegen.
- › Das Datenmodell für den digitalen Zwilling soll über die drei betrachteten Werften vereinheitlicht werden.
- › Das digitale Assistenzsystem soll eine hohe Kompatibilität zu bestehenden IT-Systemen aufweisen.
- › Das digitale Assistenzsystem soll von Messsystemen bzw. Automationssystemen bereitgestellte Sensordaten automatisiert verarbeiten können.

- › Das digitale Assistenzsystem soll unabhängig von spezifischen Endgeräten (Hersteller, Betriebssystem) nutzbar sein.
- › Aufgrund der Gegebenheiten an Bord von Schiffen muss eine Offline-Funktionalität des digitalen Assistenzsystems gewährleistet sein.
- › Das digitale Assistenzsystem soll intuitiv bedienbar sein und eine hohe Nutzerakzeptanz aufweisen.

3. SYSTEMARCHITEKTUR

Auf Grundlage der Prozessanalyse sowie der abgeleiteten Anforderungen wurde ein digitales Assistenzsystem entwickelt. Der schematische Aufbau des Assistenzsystems sowie die Anbindung an externe Systeme ist in Abb. 1 dargestellt. Zentraler Bestandteil des Assistenzsystems ist der digitale Zwilling, in dem sämtliche Daten entlang des Inbetriebnahmeprozesses gespeichert werden. Da die einzelnen Aspekte der Erstellung, Terminierung und Durchführung von Inbetriebnahmeprüfungen in sich schon eine hohe Komplexität aufweisen und i.d.R. von unterschiedlichen Rollen verantwortet werden, wurde das Assistenzsystem in drei Assistenten aufgeteilt. Der Erstellungsassistent dient der Erstellung von Inbetriebnahmeprüfungen sowie der Definition von Abhängigkeiten. Dabei wird auf Daten aus PLM- bzw. PDM-Systemen zurückgegriffen. Der Terminierungsassistent dient der Planung und Steuerung der Inbetriebnahme unter Berücksichtigung von Kapazitäten sowie terminlichen Randbedingungen und basierend auf den zuvor erstellten Prüfungen und Abhängigkeiten. Hierfür wird u.a. auf Termin- und Kapazitätsinformationen aus externen Systemen zugegriffen. Die eigentliche Durchführung der Prüfungen wird durch den Durchführungsassistenten unterstützt. Neben der Informationsversorgung findet in diesem Assistenten auch die Dokumentation der Prüfungen statt, die im digitalen Zwilling zentral gespeichert wird. Um eine automatisierte Erfassung von Sensorwerten während der Prüfung zu ermöglichen, wird hierbei zusätzlich auf Daten der Schiffsautomation zugegriffen. Der Datenaustausch zwischen der Schiffsautomation und dem Assistenzsystem findet über OPC UA statt, da dieser Standard immer häufiger eingesetzt wird [3]. Das gesamte Assistenzsystem ist darüber hinaus als Web-Applikation ausgelegt, sodass es unabhängig von spezifischen Endgeräten in allen modernen Web-Browsern genutzt werden kann.

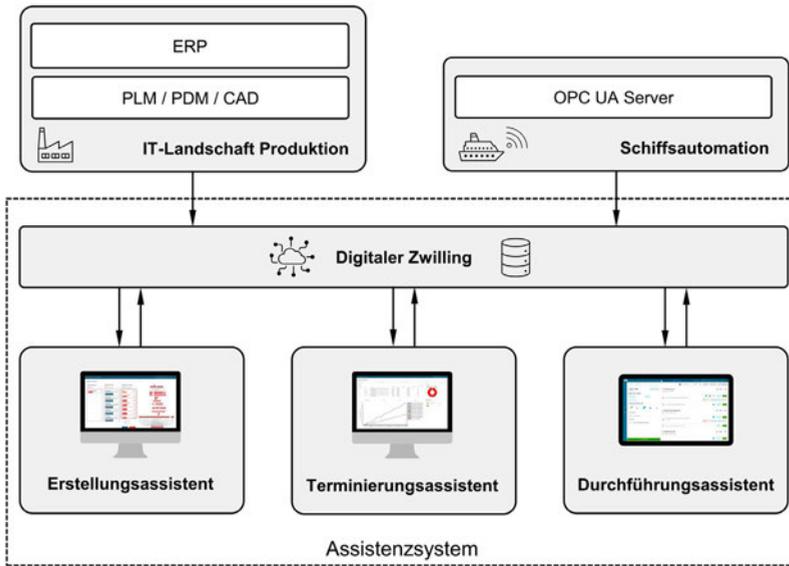


Abb. 1: Systemarchitektur des Assistenzsystems mit digitalem Zwilling und drei Assistenten

4. AUFWANDSARME PRÜFUNGS- UND ABHÄNGIGKEITSERSTELLUNG

Die Inbetriebnahme eines Schiffes kann mehrere Tausend Prüfungen umfassen. Für diese müssen zunächst Prüfspezifikationen erstellt und daraufhin technische Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Prüfungen definiert werden, die für die spätere Reihenfolgebildung genutzt werden. Um den Aufwand für diese Tätigkeiten zu verringern, wurde ein Vorgehen zur automatischen Ableitung von Prüfungen und aufwandsarmen Definition von Abhängigkeiten entwickelt.

4.1. AUTOMATISCHE PRÜFUNGSABLEITUNG

Der Erstellungsassistent verfolgt einen auf Vorlagen beruhenden Ansatz zur automatischen Prüfungsableitung [1]. Abb. 2 zeigt den schematischen Ablauf. Auf der linken Seite stehen die Prüfungsvorlagen. Diese werden einmalig für jede Art von Prüfung generisch erstellt und können in nachfolgenden Schiffbauprojekten wiederverwendet werden. Sie enthalten das Grundgerüst aus abzuarbeitenden Prüfschritten, erforderlichen Ressourcen, Vorbedingungen zur Durchführung der Prüfung und Dauer der Prüfung. Auf der rechten Seite stehen 2D- und 3D-Daten sowie Bauteilattribute, die der Erstellungsassistent für die zu prüfenden Systeme aus den PLM- bzw. PDM-Systemen bezieht. Mit diesen Informationen können auf Basis der Stücklisteninformationen für jede Komponente die durchzuführenden Prüfungen automatisch abgeleitet werden, indem die entsprechende Prüfungsvorlage mit den konkreten Daten und Informationen der Komponente befüllt wird.

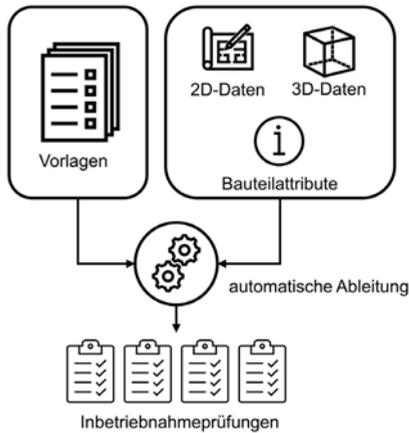


Abb. 2: Schematischer Ablauf zur automatischen Ableitung von Inbetriebnahmeprüfungen

4.2. DEFINITION VON ABHÄNGIGKEITEN

Das Ergebnis der automatischen Prüfungsableitung sind einzelne Prüfungen, die noch in keinem Zusammenhang zueinanderstehen. Da die Prüfungen jedoch oftmals in einer bestimmten, technisch bedingten Reihenfolge durchgeführt werden müssen, ist die Definition von Abhängigkeiten zwischen den Prüfungen erforderlich. Um auch diesen Prozess möglichst effizient zu gestalten, wird auf vorhandene Informationen zu den Komponenten zurückgegriffen. Aus dem Schema eines Systems sowie aus Kabel- und Signalverbindungen können Abhängigkeiten zwischen den Komponenten abgeleitet werden. Diese können wiederum auf die Prüfungen der Komponenten übertragen werden [1]. Abb. 3 zeigt beispielhaft die Abhängigkeiten zwischen Inbetriebnahmeprüfungen, die sich aus Schema-, Kabel- und Signalinformationen eines Systems ergeben.

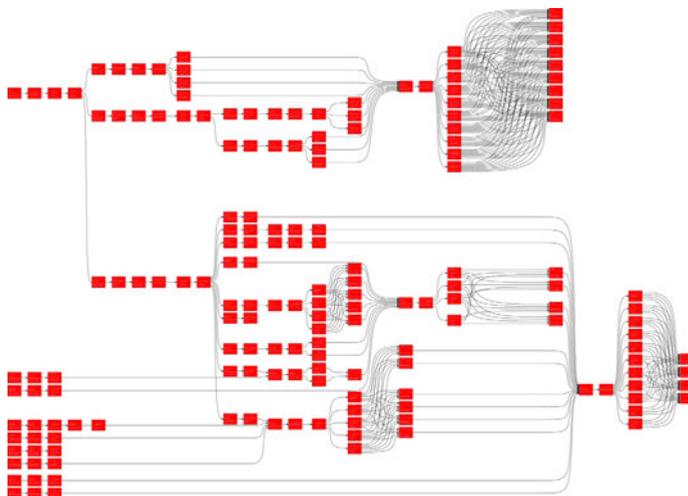


Abb. 3: Abhängigkeiten zwischen Inbetriebnahmeprüfungen (rot dargestellt), basierend auf Schema-, Kabel- und Signalinformationen

5. TERMINIERUNGSASSISTENT ZUR PLANUNG UND STEUERUNG

Die im Erstellungsassistenten erzeugten Prüfungen sind die Basis für die Durchführung der Inbetriebnahme. Um die Planung und Steuerung der Durchführung zu unterstützen, wurde der Terminierungsassistent entwickelt. Er besteht aus einem Planungs-, Steuerungs- und Überwachungsmodul. Das in den folgenden Unterkapiteln beschriebene Konzept des Terminierungsassistenten inkl. der wichtigsten Ein- und Ausgangsgrößen wird in Abb. 4 dargestellt.

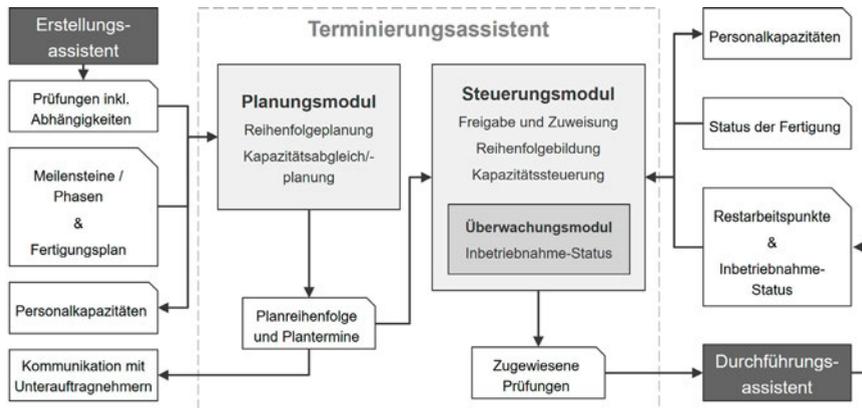


Abb. 4: Konzept des Terminierungsassistenten inklusive Schnittstellen zu den Assistents und externen Daten

5.1. PLANUNGSMODUL

Für die Absprache von Terminen mit Unterauftragnehmern, für die Kapazitätsplanung und als Basis für die spätere Inbetriebnahme-Steuerung werden bereits in einer frühen Phase der Inbetriebnahme grobe Plan-Termine und eine Plan-Reihenfolge benötigt. Das Konzept sieht daher vor, zunächst auf Basis der technischen und terminlichen Randbedingungen unter Berücksichtigung der verfügbaren Personalkapazitäten einen groben Terminplan aufzustellen. Zu diesem Zweck wurde ein zweistufiger Planungsalgorithmus entwickelt. Im ersten Planungsschritt werden die im Erstellungsassistenten erzeugten Prüfungen inklusive ihrer technischen Abhängigkeiten in eine Planreihenfolge gebracht. Die Grundlage dieses Planungsschrittes bildet die aus dem Projektmanagement bekannte Netzplantechnik. Im zweiten Planungsschritt wird zunächst für jede Prüfung der frühestmögliche Starttermin berechnet. Anschließend werden die benötigten und die verfügbaren Personalkapazitäten verglichen und die Prüfungen im Bedarfsfall verschoben, sodass realistische Plantermine entstehen. Aufgrund geringer Personalkapazitäten oder durch eine zu enge Planungsvorgabe kann es vorkommen, dass die vorgegebenen Projektmeilensteine nicht eingehalten werden können. Dies wird vom Planungsalgorithmus erkannt, sodass in diesem Fall der Anwender vom Planungsmodul über die Höhe der fehlenden Personalkapazitäten und der Terminabweichung des Meilensteins informiert werden kann. Der Anwender kann daraufhin entscheiden, ob eine Verschiebung des Meilensteins erfolgen soll und/oder die Planung der Personalkapazitäten anpassen.

5.2. STEUERUNGSMODUL

Eine Herausforderung bei der Inbetriebnahme ist die große Anzahl kurzfristiger Detailanpassungen des Terminplans. Diese resultiert unter anderem aus der großen Anzahl an Prozessbeteiligten, den vielen Abhängigkeiten zwischen den Prüfungen und der engen Verknüpfung zu den Fertigungsprozessen. Daher ist eine effektive Steuerung der Inbetriebnahme unter Berücksichtigung des aktuellen Inbetriebnahme-Status essentiell für einen möglichst reibungslosen Inbetriebnahme-Prozess. Aus diesem Grunde wurde das Steuerungsmodul in Verknüpfung mit dem Überwachungsmodul entwickelt. Die Hauptaufgabe des Steuerungsmoduls ist es, den Anwender bei der Zuweisung der Prüfungen zu den einzelnen Inbetriebnahmeteams zu unterstützen. Dazu werden zum einen Informationen wie der Status der im Projekt abgeleiteten Freigabekriterien (Abschluss der Vorgängerprüfungen, Fertigstellung der Installation, Ressourcenverfügbarkeit) angezeigt. Zum anderen wird eine Reihenfolge auf Basis der Plandaten vorgeschlagen. Auf dieser Basis kann der Anwender im Steuerungsmodul die Prüfungen per drag and drop den Inbetriebnahmeteams zuweisen, siehe Abb. 5. Die zugewiesenen Prüfaufgaben stehen anschließend im Durchführungsassistenten zur Verfügung. Probleme während der Durchführung können wiederum in Form von Restarbeitspunkten im Durchführungsassistenten erfasst und zurück in das Steuerungsmodul übertragen werden.

The screenshot displays a software interface for task management. On the left, a table lists tasks with columns for Name, Duration, Plan-Start, Plan-End, Resources, Assigned, Conditions, Link, Invitations, and Info. A task with ID X004 is highlighted in blue. On the right, a panel titled 'Team no. 5' shows a list of tasks assigned to that team, including part IDs, test names, and durations. A red button labeled 'ASSIGN CHANGES' is visible. A black arrow points from the highlighted task in the table to the team assignment panel.

Name	Duration	Plan-Start	Plan-End	Resources	Assigned	Conditions	Link	Invitations	Info	
X005	037ZX005 Switch Cabinet [HAT]	1 DAY	10.10.2023, 11:54:00	11.10.2023, 11:54:00	ElectricalEngineer_Signals	...	✗	⚠	🔗	
X004	0351X004 Generator [FAT]	4 HOUR	11.10.2023, 15:54:00	12.10.2023, 11:54:00	ElectricalEngineer_Signals	...	✗	⚠	🔗	S+P
X004	037ZX004 Generator [FAT]	4 HOUR	11.10.2023, 11:54:00	11.10.2023, 15:54:00	ElectricalEngineer_Signals	...	✗	⚠	🔗	
X006	0351X006 Fan [HAT]	2 DAY	12.10.2023, 11:54:00	16.10.2023, 13:54:00	ElectricalEngineer_Signals	...	✗	⚠	🔗	C
X006	037ZX006 Fan [HAT]	2 DAY	11.10.2023, 15:54:00	16.10.2023, 09:54:00	ElectricalEngineer_Signals	...	✗	⚠	🔗	
X001	0351X001 Temperature Strom [FAT]	3 DAY	17.10.2023, 09:54:00	20.10.2023, 09:54:00	ElectricalEngineer_Signals	...	✗	⚠	🔗	
X007	0351X007 Temperature Strom [FAT]	3 DAY	20.10.2023, 10:00:00	25.10.2023, 12:00:00	ElectricalEngineer_Signals	...	✗	⚠	🔗	S

Abb. 5: Zuweisung der Prüfungen zu den Inbetriebnahme-Teams im Steuerungsmodul

Der aktuelle Inbetriebnahme-Status wird als Übersicht im Überwachungsmodul angezeigt, vergleiche Abb. 6. Dort werden Statusinformationen zur Inbetriebnahme in verschiedenen Diagrammen visualisiert, z.B. Detailinformationen zum Durchführungsstatus je Prüfung (oben links), der Anteil insgesamt abgeschlossener Prüfungen (oben rechts), der Status der Meilensteine (unten rechts) sowie der Inbetriebnahme-Fortschritt im Vergleich zum Plan (unten links). Die angezeigten Daten werden aus den Rückmeldedaten des Durchführungsassistenten berechnet.

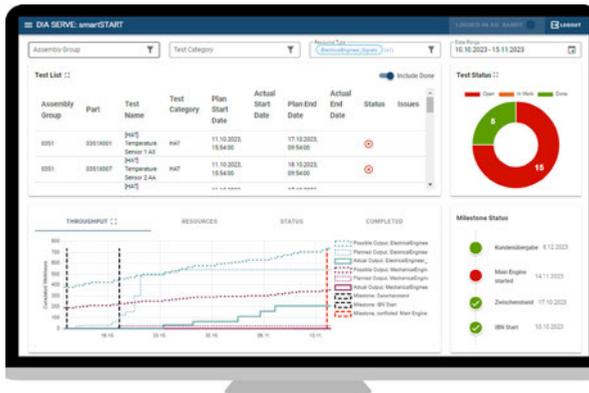


Abb. 6: Statusübersicht der Inbetriebnahme im Überwachungsmodul

6. MOBILES ASSISTENZSYSTEM FÜR DIE INBETRIEBNAHME

Der Durchführungsassistent ist ein mobiles Assistenzsystem für die Unterstützung des Inbetriebnehmers bei der Abarbeitung und Dokumentation von Prüfungen. Die Anwendung ist für die Nutzung auf mobilen Endgeräten, wie z. B. Tablets, optimiert, was die Mitnahme an Bord von Schiffen erlaubt. Wesentliche Funktionen sind die Informationsversorgung, die Dokumentation von Prüfschritten, die Verbindung zu Messsystemen und die Dokumentation von Abweichungen.

6.1. INFORMATIONSVERSORGUNG

Die erfolgreiche Durchführung einer Inbetriebnahmeprüfung hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. So muss zum einen sichergestellt sein, dass die zu prüfende Komponente bereits vollständig eingebaut ist und alle benötigten Ressourcen, wie z. B. Werk- und Prüfzeuge, vorhanden sind. Zum anderen müssen alle aus den Abhängigkeiten hervorgehenden Vorgängerprüfungen vollständig abgeschlossen sein, damit der Inbetriebnehmer mit der Prüfung beginnen kann. Um den Inbetriebnehmer bestmöglich mit allen relevanten Statusinformationen zu versorgen, werden diese Informationen aggregiert in der Prüfungsübersicht dargestellt (Abb. 7). Auf der linken Seite werden die zugewiesenen Prüfungen aufgelistet. Neben Informationen wie der Prüfungsbezeichnung, der Baugruppe und der zu prüfenden Komponente, sind auch die Freigabekriterien jeweils mit einem farbigen Symbol markiert. Rote Symbole bedeuten, dass nicht alle Vorbedingungen erfüllt sind, um die Prüfung durchführen zu können. Darüber hinaus werden auf der rechten Seite die Prüfungen auf dem 2D-Layout des Schiffes verortet. Zusätzlich sind gesperrte Bereiche dargestellt, die eine Durchführung der Prüfung verhindern würden.

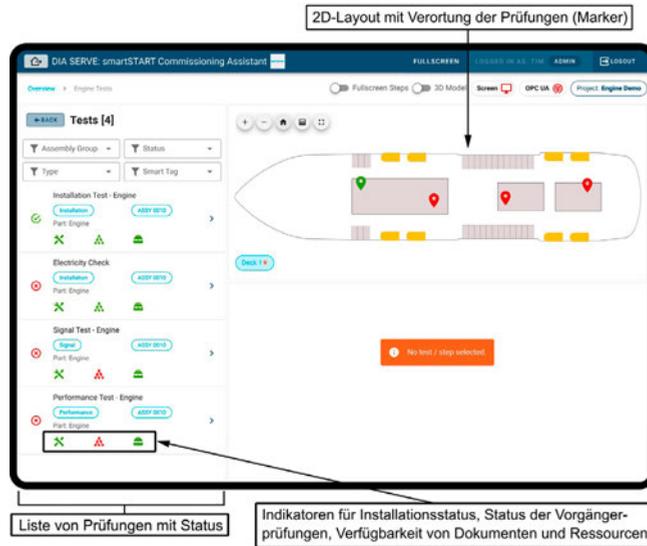


Abb. 7: Durchführungsassistent mit Anzeige der freigegebenen Inbetriebnahmeprüfungen (links) und ihre Position auf dem 2D-Layout (rechts) (in Anlehnung an [2])

6.2. ABARBEITUNG UND VERBINDUNG ZU MESSSYSTEMEN

Der Durchführungsassistent unterstützt den Inbetriebnehmer ebenfalls bei der Abarbeitung und Dokumentation der einzelnen Prüfschritte. Sobald eine Prüfung aus der Liste ausgewählt wird, öffnet sich die Prüfungsansicht (Abb. 8). Auf der linken Seite werden die durchzuführenden Prüfschritte und deren Status sowie etwaige Zusatzinformationen zur Bearbeitung aufgelistet. Im oberen rechten Bereich wird das 3D-Modell des Systems eingeblendet und die für die Prüfung relevanten Komponenten zur besseren Identifikation hervorgehoben. Im unteren rechten Bereich der Ansicht befinden sich detailliertere Informationen zum aktiven Prüfschritt. Neben angehängten Dokumenten und Bildern können auch notwendige Messungen vermerkt sein. Sofern die Messwerte der Sensoren über OPC UA bereitgestellt werden, verbindet sich das Assistenzsystem automatisch entsprechend der vorkonfigurierten Datenverbindung mit dem Server und stellt die aktuellen Messwerte in der Benutzeroberfläche dar. Ebenfalls erfolgt ein automatischer Abgleich der aktuellen Sensorwerte mit den Referenzwerten. Die Sensorwerte können bei der Abarbeitung des Prüfschritts automatisch übernommen und im digitalen Zwilling gespeichert werden.

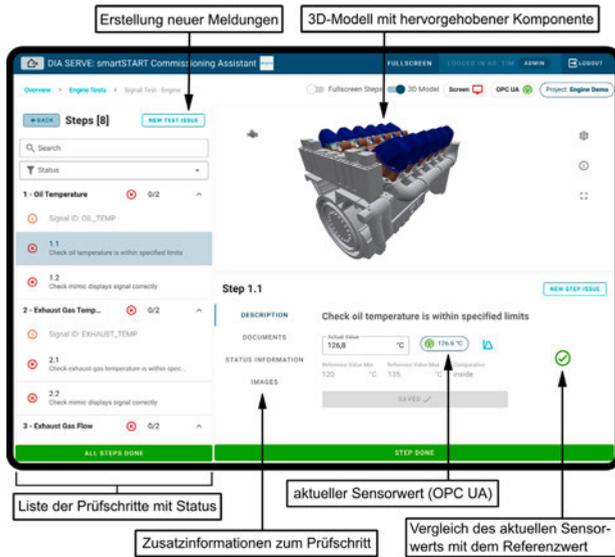


Abb. 8: Durchführungsassistent mit Darstellung der Schritte der aktuellen Inbetriebnahmeprüfung (links), der hervorgehobenen Prüfkompente im 3D-Modell (rechts oben) und der aktuellen Messwerte über OPC UA (rechts unten) (in Anlehnung an [2])

6.3. DOKUMENTATION VON ABWEICHUNGEN

Die Inbetriebnahmeprüfungen können Abweichungen offenlegen, die im Nachgang behoben werden müssen. Um diese zentral und einheitlich zu dokumentieren, kann der Inbetriebnehmer aus dem Kontext einer Prüfung heraus eine Meldung (z. B. Fehlerreport oder Restarbeitspunkt) erstellen (siehe Abb. 8 links oben). Abb. 9 zeigt die Ansicht im Assistenzsystem zur Erstellung eines Restarbeitspunkts. Wesentliche Informationen, wie Referenzen zur Prüfung und der zu prüfenden Komponente, werden automatisch befüllt. Die Verortung wird ebenfalls automatisch aus den vorhandenen Informationen zum Prüfort abgeleitet. Dem Inbetriebnehmer obliegt lediglich die Angabe einer Fehlerkategorie, eines Fälligkeitsdatums sowie einer Beschreibung. Sofern erforderlich, kann der Report durch Fotos ergänzt werden.

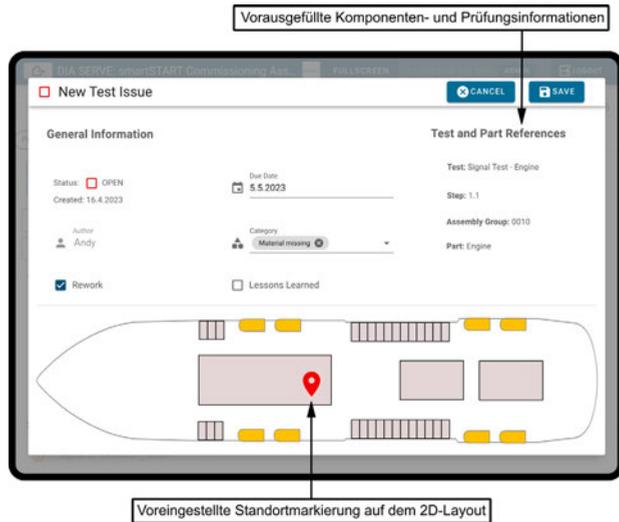


Abb. 9: Erstellung eines Restarbeitspunkts mit vorausgefüllten Bauteil- und Standortinformationen (in Anlehnung an [2])

7. TESTSZENARIEN

Um die Funktionen des Erstellungs-, Terminierungs- und Durchführungsassistenten testen und im Weiteren bewerten zu können, bedurfte es der Bereitstellung adäquater Test-szenarien und Versuchsumgebungen. Gemäß der interdisziplinären Aufteilung des Forschungsverbundes wurden dafür unterschiedliche Szenarien seitens der Industriepartner gewählt:

- › Die Fr. Lürssen Werft befasste sich mit dem maschinenbaulichen Szenario der Inbetriebnahme von Außenhautporten.
- › Die Werft Abeking & Rasmussen wählte als Szenario die klimatechnische Inbetriebnahme von Air-Conditioning-Anlagen.
- › Die Meyer Werft betrachtete das elektrotechnische Szenario der Prüfung von Analog- und Bussignalen.

Durch diese Aufteilung wurde im Verbund ein ganzheitlicher Testumfang erreicht und sichergestellt, dass das Assistenzsystem für die gesamte Inbetriebnahme einsetzbar ist.

Eine weitere Stärke des Verbundes lag in der Anwendung der verschiedenen Testumgebungen, da die Tests sowohl an Bord von Neubauprojekten, als auch im Labor an einem Versuchsaufbau umgesetzt wurden. Die Vorzüge der unterschiedlichen Umgebungen und darüber hinaus die Verwendung von variierenden Detaillierungsgraden in den Szenarien, ergänzten sich gut in der konsolidierten Bewertung des Assistenzsystems.



Abb. 10: Stationäre und mobile Air-Conditioning-Anlagen, an Bord bei Abeking & Rasmussen



Abb. 11: Versuchsaufbau mit repräsentativen Automationsignalen, im Labor der Meyer Werft

Für die Evaluierung wurde auf qualitative und quantitative Bewertungsmethoden zurückgegriffen. Als qualitative Bewertungsmethode wurden Fragebögen verwendet, welche der Bewertung der Funktionen des Erstellungs-, Terminierungs- und Durchführungsassistenten durch Fachexperten dienen. In der quantitativen Bewertung wurden die betrachteten Inbetriebnahmeszenarien in die relevanten Arbeitsschritte und ihre Prozessparameter detailliert. Gemeinsam mit den Rollenvertretern wurden in Messungen in der Testumgebung oder in Fachgesprächen die Werte der Prozessparameter erhoben. Darüber hinaus wurden ebenfalls Anwender-Feedbacks aufgenommen, um ein vollständiges Bild aus Expertensicht zu erhalten.

Die erhobenen und dokumentierten Daten dienen im Folgenden der Bewertung und abschließenden Beurteilung des Assistenzsystems.

8. ERGEBNISSE & FAZIT

Aus den Ergebnissen zeigt sich, dass sich in diversen Teilprozessen der Inbetriebnahme wesentliche Vorteile durch die Verwendung des Assistenzsystems ergeben. Folgende Beispiele verdeutlichen die erhobenen Potentiale:

- › Die durchgängige und vereinfachte Kommunikation sowie die daraus resultierende Reduzierung von Fehlerquellen verringern den Aufwand in der Kommunikation um bis zu 40 %.
- › Die unterstützte Ressourcen- und Arbeitsplanung sowie die automatische Erhebung von Statusmeldungen verbessert die Effizienz in diesen Tätigkeiten um bis zu 30 %.
- › Die automatisierte Planung und Steuerung mit priorisierter Reihenfolgebildung reduziert diese Planungsaufwände um bis zu 50 %.

Die Verbesserungspotentiale in den einzelnen Teilprozessen sind z.T. erheblich und für den Gesamtinbetriebnahmeprozess ergeben sich durch die Unterstützung der drei Assistenten insgesamt Einsparungspotentiale von bis zu 10%. Die Effekte zeigen sich primär in den administrativen und organisatorischen Tätigkeiten, wozu beispielsweise, ergänzend zu den oben aufgeführten Potentialen, auch die vereinfachte Erstellung von Prüfungsunterlagen sowie die Verortung der Systeme auf dem Generalplan zu nennen sind. Nicht zu vernachlässigen sind zudem die Sekundäreffekte, die durch die durchgängige Datenhaltung entstehen. Der Einfluss der höheren Informationsqualität und -erreichbarkeit auf die Transparenz und Qualität im Inbetriebnahmeprozess lässt ebenfalls einen weiteren, hohen Mehrwert erwarten.

Um dies zu erreichen, ist im Anschluss an das Projekt die sukzessive Integration und Weiterentwicklung der Digitalisierung der Inbetriebnahme erforderlich. Zum Teil schon vorhandene oder in Umsetzung befindliche Anwendungen werden mit den Erkenntnissen aus dem Projekt weiterentwickelt oder neu aufgesetzt. Auf dem Weg zu einer vollständigen und vernetzten Systemlandschaft können die Methoden und Lösungsansätze auch bei der Betrachtung weiterer Wertschöpfungsprozesse verwendet werden, um langfristig das volle Potential aus einer durchgängigen, digitalen Datenhaltung im Wertschöpfungsprozess zu nutzen.

Das Projekt hat durch die Entwicklung des digitalen Zwillings für den Inbetriebnahmeprozess die effektive Arbeitsunterstützung durch digitale Assistenzsysteme konzeptionieren und belegen können. Das breite Betrachtungsspektrum durch verschiedene Szenarien führte zu einem Lösungsansatz, der für die gesamte Inbetriebnahme geeignet ist. Das Assistenzsystem kann für weitere Tests und auch für anknüpfende Forschung und Lehre verwendet und erweitert werden. Möglich ist hier zum Beispiel die Ausweitung des digitalen Produktabbildes im weiteren Produktlebenszyklus sowie auf die Zulieferkette.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Inbetriebnahme ist ein entscheidender Schritt im Fertigstellungsprozess eines Schiffes und zählt zu den technisch anspruchsvollsten Phasen. Hier werden sämtliche Informationen der technischen Systeme zusammengeführt und diese abschließend in Betrieb genommen, erprobt und abgenommen. Aufgrund der Komplexität dieses Prozesses und der damit verbundenen hohen Störungsanfälligkeit gestaltet sich die Planung und Durchführung oft äußerst herausfordernd.

Im Projekt smart.START wurde erfolgreich ein digitaler Zwilling der Inbetriebnahme erschaffen. Darauf basierend fand die Entwicklung eines digitalen Assistenzsystems statt, das die Inbetriebnahme mithilfe von drei verschiedenen Tools unterstützt: dem Erstellungsassistenten, dem Terminierungsassistenten und dem Durchführungsassistenten. Diese Tools sind jeweils auf die spezifischen Kerntätigkeiten ausgerichtet.

Der Erstellungsassistent aggregiert grundlegende Informationen aus der Konstruktion und der Planung. Er ermöglicht die automatisierte Erstellung sämtlicher Inbetriebnahmetätigkeiten und weist diese automatisch den entsprechenden Komponenten und Bauteilen zu.

Der Terminierungsassistent greift auf die erstellten Inbetriebnahmetätigkeiten zurück und berechnet automatisiert eine Planreihenfolge und Plantermine. Berücksichtigt werden hierbei die verfügbaren Personalkapazitäten, terminlichen Randbedingungen und technischen Abhängigkeiten. Ein integriertes Steuerungsmodul ermöglicht die direkte Zuweisung der Tätigkeiten an die ausführenden Inbetriebnahmeteams. Erweitert wird die Funktionalität durch ein Überwachungsmodul, das den aktuellen Stand der Abarbeitung der Inbetriebnahme auswertet und darstellt.

Im Durchführungsassistenten finden die Inbetriebnehmer alle erforderlichen Informationen für die Durchführung und Dokumentation der zugewiesenen Aufgaben. Hierzu gehören unter anderem die Beschreibung der Tätigkeiten und Arbeitsschritte, die Lokalisierung der Bauteile auf dem Generalplan und im 3D-Modell, die einzuhaltenden Referenzwerte und die arbeitsrelevanten Dokumente. Darüber hinaus verbessert der Durchführungsassistent die direkte Kommunikation zwischen den Prozessbeteiligten.

Insgesamt führt die Nutzung des digitalen Assistenzsystems zu einer effizienteren, transparenteren und zuverlässigeren Inbetriebnahme.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken den Mitarbeitern des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) sowie des Projektträgers Jülich (PTJ) für die finanzielle Förderung und administrative Unterstützung des Verbundprojektes smart.START.

LITERATUR

- [1] Elzalabany, A., Settler, V., Jansen, T., et al.: Automated generation and loweffort authoring of commissioning content in the maritime industry. In: International Conference on Computer Applications in Shipbuilding (ICCAS). The Royal Institution of Naval Architects, London 2022, S. 85-96.
- [2] Jansen, T.M., Karl, O., Elzalabany, A., Lödding, H.: Streamlining the Execution of Maritime Commissioning with a Digital Assistance System. In: Alfnes, E., Romsdal, A., Strandhagen, J.O., von Cieminski, G., Romero, D. (Hrsg.): Advances in Production Management Systems. Production Management Systems for Responsible Manufacturing, Service, and Logistics Futures. APMS 2023. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Springer, Cham 2023, S. 49-63.
- [3] Südekum, N.: Schiffbauoptimierung durch Standardisierung. Schiff&Hafen 72, 2020; S. 12–13.

GROUT-WATCH

UNTERSUCHUNG DES TRAGVERHALTENS VON OFFSHORE-GROUT-VERBINDUNGEN
UNTER WASSER AN TRAGSTRUKTUREN MIT DYNAMISCHEN WECHSELWIRKUNGEN

AUTOREN

DR. ANDREAS NUBER	WÖLFEL ENGINEERING GMBH + CO. KG
JAKOB BORGELT	INSTITUT FÜR STAHLBAU, LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER
DR.-ING. MAREIKE COLLMANN	TESTZENTRUM TRAGSTRUKTUREN HANNOVER, LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER
DENNIS DREGER	INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER
DR. HERBERT FRIEDMANN	WÖLFEL ENGINEERING GMBH + CO. KG
DR.-ING. MARTIN KOHLMEIER	FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WINDENERGIESYSTEME
TOBIAS SCHOSSIG	MIOPAS GMBH
NIKLAS RÖMGENS	INSTITUT FÜR STATIK UND DYNAMIK, LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER
DR.-ING. STAVROULA TSIAPOKI	WÖLFEL ENGINEERING GMBH + CO. KG
DR.-ING. STEFAN WERNITZ	WÖLFEL ENGINEERING GMBH + CO. KG

1. EINLEITUNG

Grout-Verbindungen sind bei der Gründung von Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) das wichtigste Bindeglied zwischen Fundament und Turm plus Gondel. Andere Anwendungsbereiche sind Öl- sowie Gasbohrinseln und Konverterstationen, allerdings treten hier weniger dynamische Belastungen auf. Die Grout-Verbindung ist eine hybride Verbindung, bei der zwei Stahlrohre (Pile und Sleeve) mit unterschiedlichen Durchmessern konzentrisch ineinander geführt werden und der Zwischenraum mit hochfestem Mörtel (Grout) vergossen wird. Durch die Anordnung von Schubrippen auf den gegenüberliegenden Stahlflächen wird eine höhere Tragfähigkeit gewährleistet [1, 2]. Auf einen in den Meeresboden gerammten Pfahl wird ein Transition Piece aufgesetzt, welches durch die Grout-Verbindung mit dem Gründungspfahl verbunden wird. Die in der deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) am häufigsten eingesetzte Gründungsvariante für OWEA ist mit 79% der Monopile [3], die zweithäufigste Gründungsvariante ist das Jacket, das 9% abdeckt [3]. Dieses bietet bei geringerem Materialverbrauch eine dennoch steife Gründungsvariante und wird daher in größeren Wassertiefen eingesetzt [4]. Die Fußpunkte der Jacket-Struktur werden durch Grout-Verbindungen mit den Gründungspfählen verbunden, vgl. Abb. 1.

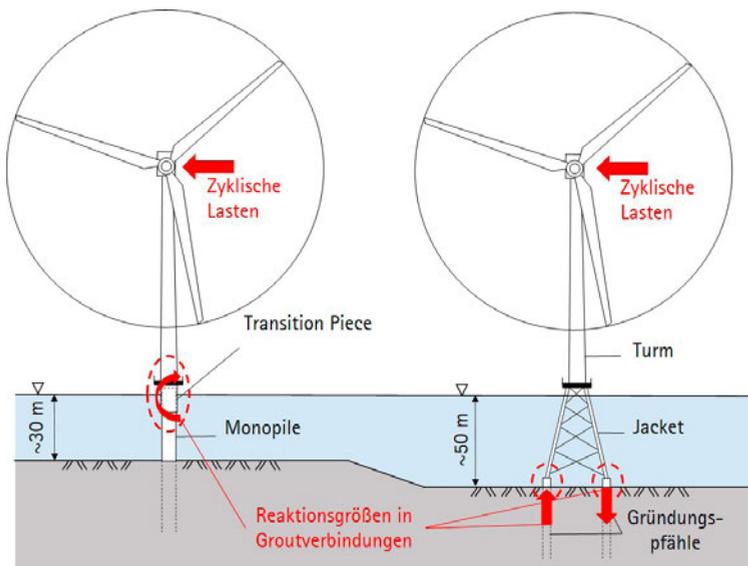


Abb. 1: Einsatzgebiete von GROUT-Verbindungen und deren unterschiedliche Belastungssituationen.

Neben den statischen Lasten müssen GROUT-Verbindungen die horizontalen, zyklisch veränderlichen Einwirkungen aus Wind und Wellen abtragen und sind über die Lebensdauer einer großen Anzahl an Lastwechseln ausgesetzt [5]. Bezüglich der Auslegung von GROUT-Verbindungen ist daher häufig die zyklisch veränderliche Belastung und somit das Ermüdungsverhalten maßgebend, das einerseits eine ständige Überwachung erfordert [6, 7] und andererseits weiterhin Gegenstand der Forschung ist.

Aufgrund der Geometrie der beiden Gründungsarten unterscheiden sich die Belastungssituationen für die eingesetzten GROUT-Verbindungen infolge der horizontalen, zyklisch veränderlichen Belastungen deutlich. Bei der Monopile-Struktur werden die horizontal angreifenden Lasten in den GROUT-Verbindungen über ein Biegemoment übertragen [8]. Bei den Jacket-Strukturen hingegen bildet sich infolge der horizontalen Lasten ein Kräftepaar an den Fußpunkten aus (siehe Abb. 1). Es ergibt sich daher eine nahezu rein axiale Belastung [9]. Im Rahmen dieses Projektes werden daher zyklisch biegebeanspruchte und zyklisch axial belastete GROUT-Verbindungen unterschieden.

Der wirtschaftliche Betrieb von OWEA ist weiterhin eine große Herausforderung, weshalb eine EEG-Einspeisevergütung gewährt wird. Diese Förderung deckt jedoch nicht den gesamten Bemessungszeitraum einer OWEA ab, sodass bereits jetzt viele OWEA aus der ursprünglichen Förderung herausfallen. Umso wichtiger ist es, die zu erwartenden Kosten für den verbleibenden Nutzungszeitraum genau abzuschätzen. Teure Reparaturmaßnahmen an Tragelementen können hier einen großen Einfluss auf den wirtschaftlichen Weiterbetrieb haben. Durch das frühzeitige Erkennen von möglichen Problemen an der Schlüsselstruktur GROUT-Verbindung kann eine Schadensentwicklung gestoppt oder behoben werden.

Die Beschreibung des Gesamtlebenszyklus von Grout-Verbindungen unter Berücksichtigung von Degradationsmechanismen ist für die frühzeitige Schadensdetektion essentiell [10, 11]. Deshalb werden in diesem Projekt experimentelle Untersuchungen an Grout-Verbindungen unter realistischen Randbedingungen durchgeführt. Zur Beschreibung der wirkenden Mechanismen während der Degradation einer Grout-Verbindung wird eine neue Sensorik entwickelt, die Informationen über die Abläufe innerhalb der Verbindung liefern soll [12]. Auf dieser Grundlage soll es möglich werden, den Zustand der Grout-Verbindung vor dem Hintergrund des gesamten Lebenszyklus zu bewerten.

2. SENSORIK ZUR ANWENDUNG IN GROUT-VERBINDUNGEN

2.1 FBG-Sensoren

Im Rahmen der Untersuchungen im Grout-Spalt wird ein optisches Messverfahren auf Basis der sogenannten Faser-Bragg-Gitter (FBG) für die Dehnungsermittlung verwendet. FBG sind optische Interferenzfilter, die in Telekommunikationsfasern neuerdings zumeist mittels Femtosekundenlasertechnik eingeschrieben werden. Das Messgerät (Interrogator) besteht aus einer Lichtquelle (z. B. eine spektral breite SLED oder einem schmalbandigen durchstimmbaren Laser) und einem Detektor (z.B. einem Spektrometer oder einer Photodiode). Das in die Faser eingebrachte Licht wird am FBG entsprechend der Bragg Bedingung schmalbandig gebeugt (reflektiert). Ändert sich durch Temperatur oder Dehnung an der Faser die Gitterkonstante des FBG, so erfolgt eine proportionale Wellenlängenverschiebung des Peaks (siehe Abb. 2).

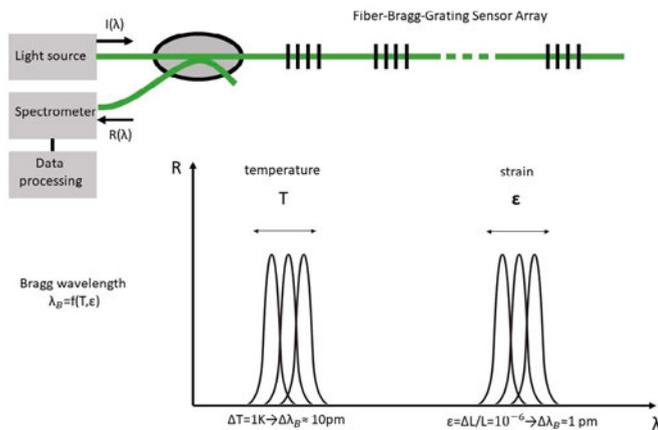


Abb. 2: Funktionsweise des Interrogators mit einem oder mehreren FBG-Sensoren.

Glasfasern zeichnen sich durch einen geringen Durchmesser (ca. $160\mu m$) und einen hohen Temperatureinsatzbereich bei nahezu inerten Eigenschaften aus. Die hier verwendete Ausführung mit einem Polyamid Coating der Faser ermöglicht eine hohe Beständigkeit gegenüber dem alkalischen Milieu im Grout. Für eine Risserfassung in einem größeren Dehnungsbereich ($> 0,1 mm$) wird die FBG-Sensorfaser in einem mechanischen Dehnungsaufnehmer (Transducer) integriert. Die Kraftübertragung zwischen Edelstahlge-

häuse und der Glasfaser erfolgt an den Ankerflächen des FBG-Sensors und stellt damit die Sensormesslänge dar. Der Sensor wird komplett im Grout eingebracht. Neuartig ist die Ausführung für einen sehr kleinen Bauraum, wie er im Grout-Spalt benötigt wird. Ziel ist es, das Grout nur geringfügig zu schwächen und gleichzeitig eine ausreichende Steifigkeit des Sensors gegenüber Rissen in Längs- und Querrichtung zu erreichen. Für die diversen Einsatzzwecke in diesem Projekt wurden unterschiedliche Längen des Sensors entwickelt und aufgebaut. Abb. 3 zeigt die unterschiedlichen Sensoren und Schutzsysteme.

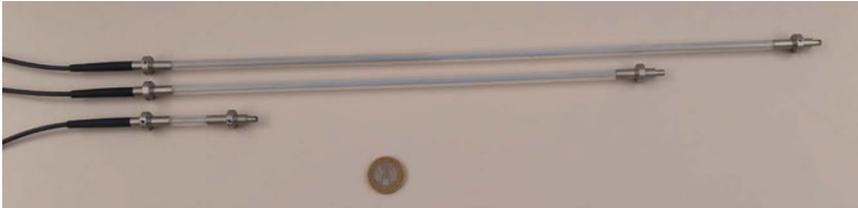


Abb. 3: Entwickelte FBG-Sensoren (50 mm, 300 mm, 400 mm) zur Rissermittlung im Grout.

2.2 VALIDIERUNG DER FBG-SENSORIK ZUM EINSATZ IM GROUT-SPALT

Für den Einsatz im Grout-Material werden die entwickelten FBG-Sensoren validiert. Hierzu wird ein axialer Schwindversuch mithilfe einer Schwindrinne gemäß OENORM B 3329 durchgeführt. Die Schwindrinne dient der Prüfung von Mörtelproben mit einer Abmessung von 1000 x 60 x 40 mm, siehe Abb. 4.

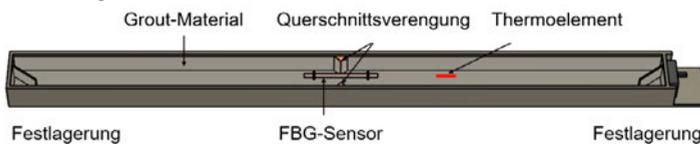


Abb. 4: Aufbau des axialen Schwindversuchs zur Rissquantifizierung.

Durch eine keilförmige Querschnittsverjüngung wird aufgrund der schwindbedingten Volumenreduktion während der Hydratation des Mörtels eine Rissbildung provoziert. Das Ziel der Untersuchung ist, dass der FBG-Sensor während des Schwindprozesses (Phase 1) diesen Riss detektiert und quantifiziert. In Phase 2 soll über eine weitere mechanische Öffnung des Risses die maximal mögliche Dehnung des Sensors ermittelt werden. Bis zu diesem Punkt ist die Rissweitenbestimmung möglich. Abb. 5 zeigt exemplarisch axiale Schwindversuche an FBG-Sensoren mit einer Ankerlänge von 300 mm. Die Reduktion der Mörteltemperatur sowie der spätere Anstieg infolge des Hydratationsprozesses lassen sich im Verlauf der Wellenlänge der FBG-Sensoren wiederfinden. So stellt sich mit einer zunehmenden Wärmefreisetzung eine Änderung der Wellenlänge des FBG-Sensors um 0,05 nm/K ein.

Das Auftreten des Schwindrisses führt zu einem geringen, sprunghaften Anstieg im Sensorsignal. Im weiteren Verlauf kommt es in Schwindrinne 1 zur Überlagerung der

temperaturbedingten Wellenlängenveränderung und der weiteren Rissöffnung durch den fortwährenden Schwindprozess (blauer Verlauf).

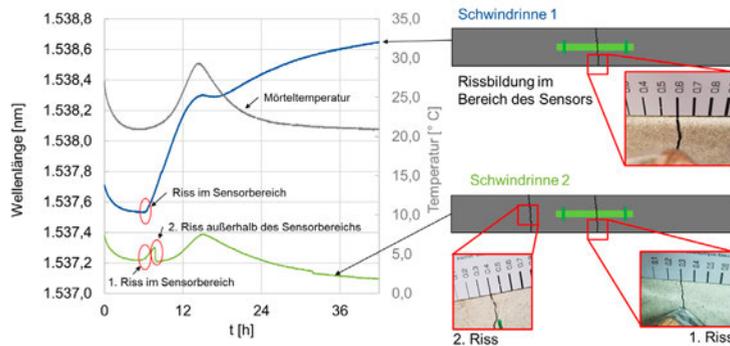


Abb. 5: Axiale Schwindversuche unter dem Einsatz von zwei FBG-Sensoren mit einer Ankerlänge von 300 mm, Messdaten der FBG-Sensoren und Temperatur über die Zeit aufgetragen (links), Schematische Darstellung der Rissbildung (rechts).

Im Gegensatz zur ersten Probe tritt bei der Schwindrinne 2 ein weiterer Riss außerhalb der Sensorlage auf. Dies führt zu einem plötzlichen Abfall der Wellenlänge, da der erste Riss durch den zweiten entlastet wird. Weil der Mörtel nicht mehr zweiseitig gelagert ist, wird das Sensorsignal der Schwindrinne 2 im weiteren Verlauf allein von der sich ändernden Mörteltemperatur beeinflusst.

Im Nachgang wird in der Phase 2 eine Rissmanipulation an dem intakten Vergussmörtel in der Schwindrinne 1 durchgeführt. Hierzu wird die Rissweitenänderung mit einem induktiven Wegaufnehmer (LVDT) beobachtet und dem Wellenlängensignal des FBG-Sensors gegenübergestellt. Zunächst wird der aufgetretene Riss zugepresst und im Anschluss durch zentrischen Zug erneut geöffnet, bis es zum Versagen des FBG-Sensors kommt. Es zeigt sich eine Linearität des optischen Messsignals im Vergleich zur aufgezeichneten Verformung mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9996$, vgl. Abb. 6.

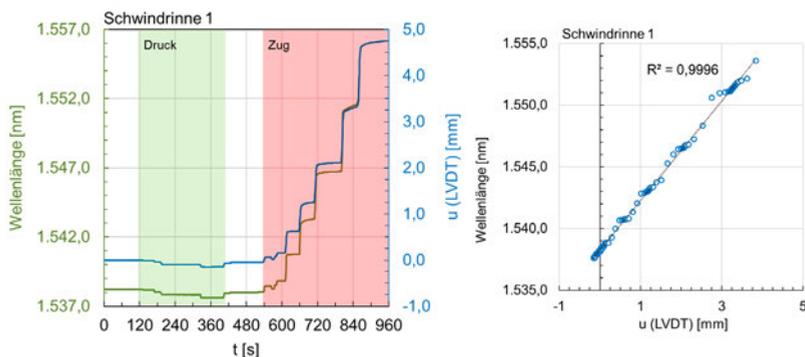


Abb. 6: Mechanische Rissweitenmanipulation, Gegenüberstellung der FBG-Sensordaten mit der Verformung des Schwindrisses über die Zeit (links), Linearitätsprüfung.

Dies ist eine geeignete Approximation, um die Rissweiten von orthogonal zur Messrichtung verlaufenden Rissen zu quantifizieren. Zum Zeitpunkt des Versagens weist der FBG-Sensor eine maximale Dehnung von $16.300 \mu\text{m}/\text{m}$ auf. Auf eine Temperaturkompensation des Signals der FBG-Sensoren wird in den nachfolgenden Untersuchungen verzichtet, da der Einfluss der Temperaturänderungen in Bezug auf die erwarteten Dehnungsgrößen als vernachlässigbar klein angenommen werden kann.

3. AXIAL BELASTETE VERBINDUNG IM KOMPONENTENVERSUCH

3.1. VERSUCHSBESCHREIBUNG

Im Folgenden werden die FBG-Sensoren in experimentellen Untersuchungen von zyklisch-axial beanspruchten Grout-Verbindungen angewandt. Mit mittelskaligen Komponentenversuchen soll die theoretische Aufarbeitung des Degradationsvorgangs ermöglicht werden. Die dazu entwickelte Messkampagne umfasst 17 Ermüdungsversuche auf verschiedenen Lastniveaus. Um die Versuche so realitätsnah wie möglich durchzuführen, befindet sich der Grout-Spalt während der Versuchsdurchführung unter Wasser.

Die axialen Ermüdungsversuche werden unter zyklischer Druckschwellbelastung mit einer Prüffrequenz von 2 Hz bis zu einem definierten Abbruchkriterium durchgeführt (15 mm Prüfkörperverschiebung). Der in Abb. 7 dargestellte Versuchskörper kann mehrfach verwendet und mit Wasser geflutet werden. Damit kann der Einfluss des Wassers beim Schädigungsvorgang berücksichtigt werden. Um während des Versuchs Einblicke in das Grout zu erhalten, werden FBG-Sensoren innerhalb des Grout-Spalts appliziert. Ergebnisse aus früheren Versuchen haben gezeigt, dass die Risse hauptsächlich in Form von Druckstrebenbrüchen zwischen gegenüberliegenden Schubrippenpaaren auftreten [4, 11]. Aufgrund der rein axial beanspruchten Prüfkörper wird angenommen, dass sich Risse über den gesamten Umfang ausbilden und deshalb durch die in axialer Richtung zueinander versetzten FBG-Sensoren (siehe Abb. 7) detektiert werden können.

Erste Ergebnisse eines Versuchs mit einer Oberlast von 700 kN, der nach 238 000 Lastwechseln das Abbruchkriterium erreichte, werden hier vorgestellt.

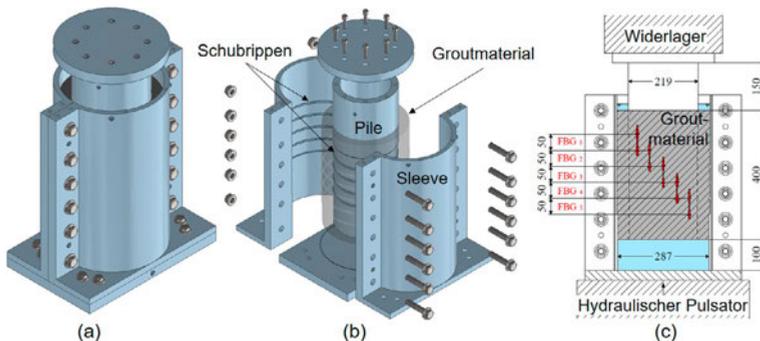


Abb. 7: (a) Montierter Versuchskörper; (b) Explosionszeichnung; (c) Positionierung der neuartigen FBG-Sensorik innerhalb des Grout-Spalts (Maßangaben in mm).

3.2. ERSTE ERGEBNISSE

Die Entwicklung der Relativverschiebung zwischen Pile und Sleeve lässt sich steigungs-
basiert in drei unterschiedliche Bereiche unterteilen (siehe Abb. 8). Zu Beginn des Ver-
suchs bleibt die Kurve über 138 000 Lastwechsel nahezu konstant. Daraufhin schließt
sich eine Phase mit linear steigender Prüfkörperverschiebung an, die wiederum von einer
Phase der progressiven Steigerung ab ca. 196 000 Lastwechseln abgelöst wird. Die
Form dieser Kurve korreliert mit Ergebnissen der kleinmaßstäblichen Ermüdungsversuche
von Raba [11]. Bisher können die Mechanismen innerhalb des Grout-Materials, die für
die charakteristische Kurvenform verantwortlich sind, ohne weitere Messtechnik nicht
exakt erkannt und zugeordnet werden. Die neuartige FBG-Sensorik schafft hier Abhilfe.

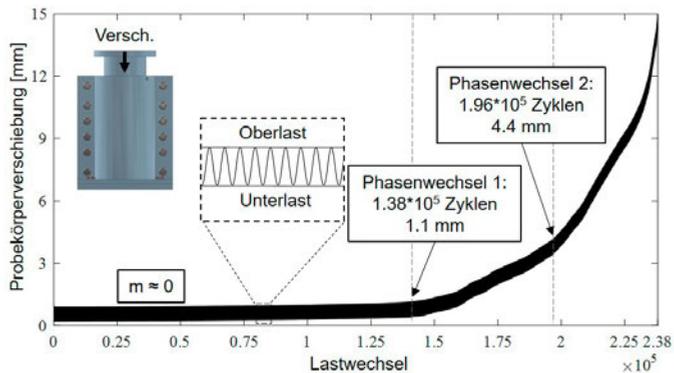


Abb. 8: Entwicklung der Prüfkörperverschiebung über die Lastwechsel.

In Abb. 9 (a) sind die aufgezeichneten Wellenlängen des Oberlastniveaus für die fünf
höhenverteilten FBG-Sensoren (FBG 1 – FBG 5) über den Lastwechseln dargestellt. Die
Verschiebungskurve auf Oberlastniveau und die entsprechenden Übergangsbereiche
sind mit gestrichelten Linien ebenfalls eingezeichnet. Zu Beginn des Versuches verhalten
sich die Kurven aller FBG-Sensoren konstant. Nach ca. 50 000 Lastwechseln ist ein
Sprung in der Kurve des Sensors FBG 1 zu erkennen, der die Entstehung eines ersten
Risses im oberen Bereich der Verbindung detektiert (Detail A). Dieser Riss öffnet sich in
der Folge leicht, bis nach ca. 87 500 Lastwechseln ein zweiter Riss von Sensor FBG 2
detektiert wird (Detail B). Nach ca. 138 000 Lastwechseln lässt sich ein sprunghaftes
Öffnen der beiden vorhandenen Risse beobachten (Detail C). Dieser Zeitpunkt korreliert
mit dem in der Prüfkörperverschiebungskurve ausgemachten ersten Phasenwechsel. Kurz
darauf ist nahezu zeitgleich die Entstehung von drei weiteren Rissen im unteren Bereich
der Verbindung zu erkennen (Detail D). Diese Risse weiten sich zu unterschiedlichen
Zeitpunkten teils stark auf, wobei die Öffnung des Risses zwischen dem untersten Schub-
rippenpaar (FBG 5) mit dem zweiten Phasenwechsel der Prüfkörperverschiebungskurve
korreliert. Zum Ende des Versuches reißen die Messdaten von vier der fünf FBG-Sensoren
ab, da diese die Grenze der ertragbaren Dehnungen überschreiten.

Nach Prüfkörperöffnung zeigt sich (siehe Abb. 9 (b)), dass durch jeden FBG-Sensor mindestens ein Riss verläuft. Zusätzlich ist zu erkennen, dass einige FBG-Sensoren mehrere Risse abdecken. Die Unterscheidung der Zeitpunkte, zu denen die einzelnen Risse auftraten, erfordert weitere Auswertungen.

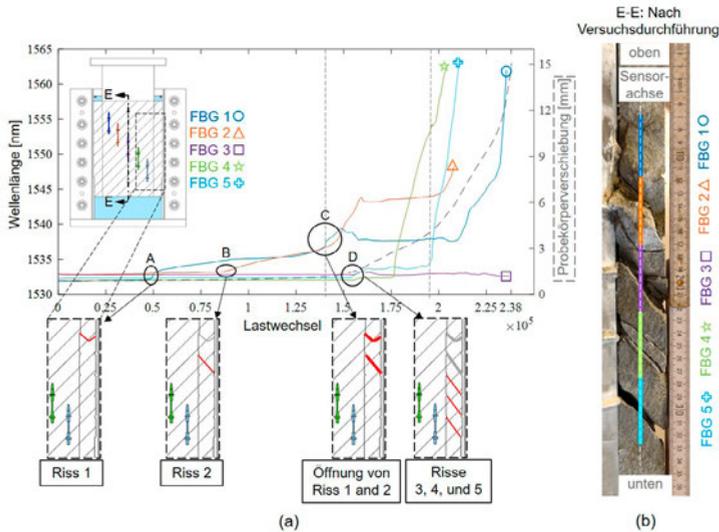


Abb. 9: (a) Darstellung der Messdaten der FBG-Sensorik über die Lastwechsel; (b) Rissbild des geöffneten Prüfkörpers.

Der erfolgreiche Komponentenversuch zeigt, dass die neu entwickelte FBG-Sensorik in der Lage ist, die Rissentstehung im Grout-Material zu detektieren. Der Zeitpunkt der Rissinitiation und die zugehörige Position können bestimmt werden, Aussagen über fortschreitende Rissöffnungen sind möglich. Zusätzlich gelingt es, die charakteristische Kurve der Prüfkörperverschiebung mit den entsprechenden Mechanismen innerhalb des Grout-Materials zu korrelieren.

4. BIEGEBELASTETE VERBINDUNG IM GROSSVERSUCH

4.1. VERSUCHSBESCHREIBUNG

Zusätzlich zu den axialen Ermüdungsversuchen wird die neuartige FBG-Sensorik ebenfalls in biegebeanspruchten Grout-Verbindungen getestet. Um die Prozesse der Schadensentwicklung in biegebelasteten Grout-Verbindungen unter hoher Wechselbelastung zu detektieren, wurden Ermüdungsversuche an einem großmaßstäblichen Modell einer Monopile-Tragstruktur im Testzentrum für Tragstrukturen Hannover (TTH) durchgeführt. Die unter realitätsnahen Bedingungen durchgeführten Versuche sollten zudem Aufschluss bezüglich des Einflusses der Degradation auf die Tragfähigkeit der Gesamtstruktur erlauben. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Schadensindikatoren für die Abbildung bzw. Detektion der Grout-Degradation untersucht.

Heutzutage umfassen die Strukturüberwachungssysteme von OWEA hauptsächlich Beschleunigungs- und Neigungssensoren, sowie Dehnungsmessstreifen (VDI-Richtlinie 4551, 2020). Diese Sensorkonfiguration ermöglicht die Strukturüberwachung auf globaler Ebene sowie die lokale Erfassung von Lasten an kritischen Ebenen. Windenergieanlagen (WEA) mit einer Grout-Verbindung sind in der Regel zusätzlich mit drei Wegsensoren an der Grout-Fuge ausgerüstet.

Die Strategie des Großversuchs [13, 14] ist es, die Grout-Verbindung einer Monopile-Tragstruktur, vgl. Abb. 10, durch Biegebeanspruchungen zu schädigen und diesen Schädigungsvorgang durch die neuartigen FBG-Sensoren im Grout lokal zu erfassen. Zusätzlich wurden zur Erfassung der axialen Verschiebungen drei Wegsensoren im Abstand von 120° außen auf der Grout-Verbindung installiert, um deren lokale Schiefstellung während des Versuchs zu erfassen. Zehn konventionelle FBG-Dehnungssensoren und fünf Beschleunigungssensoren wurden installiert, um zusätzlich die globale Strukturüberwachung zu ermöglichen (vgl. Abb. 10 und Abb. 11). Durch diese Sensorkonfiguration sollen Zusammenhänge zwischen den Daten aus den im Grout installierten FGB-Sensoren, die typischerweise kein Bestandteil eines Monitoring-Systems sind, und den ‚typischen‘ Sensoren eines Überwachungssystems, erkannt werden.

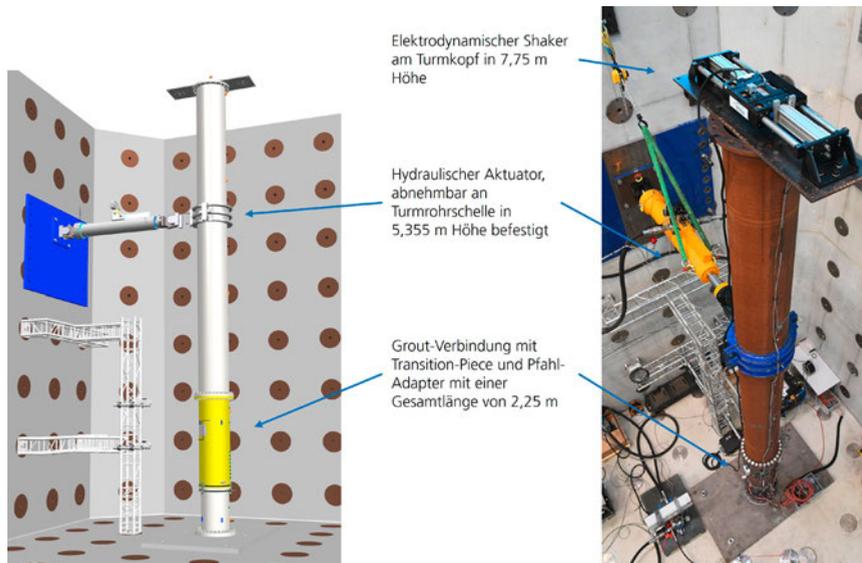


Abb. 10: CAD-Darstellung des Versuchsstands mit Turm und Grout-Verbindung (links). Foto des Versuchsstands im Spannungsfeld des TTH (rechts).

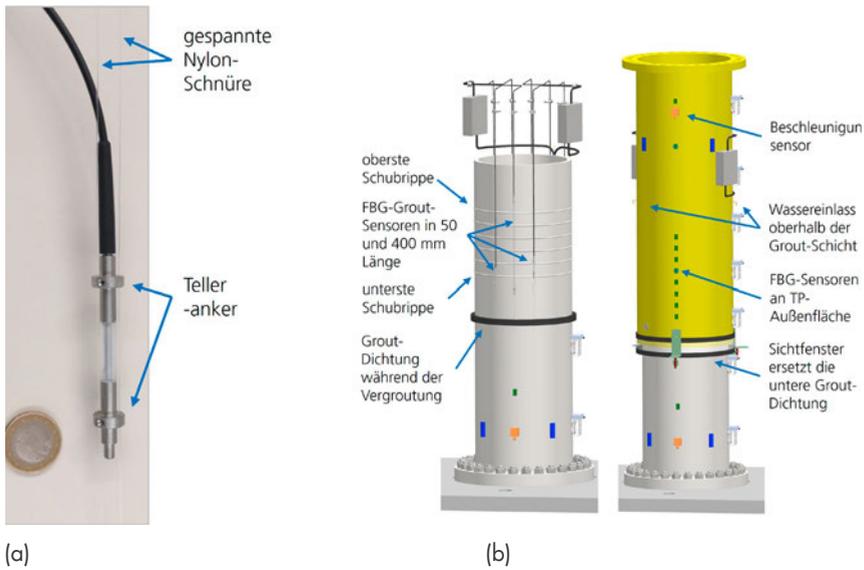


Abb. 11: (a) Foto mit FBG-Grout-Sensor von MIOPAS. (b) Positionierung der 50 mm und 400 mm langen FBG-Grout-Sensoren vor dem mit Schubrippen versehenen inneren Pile-Rohr. Ansicht der gesamten Grout-Verbindung mit Sensorik an Transition-Piece und Pile-Adapter (rechts).

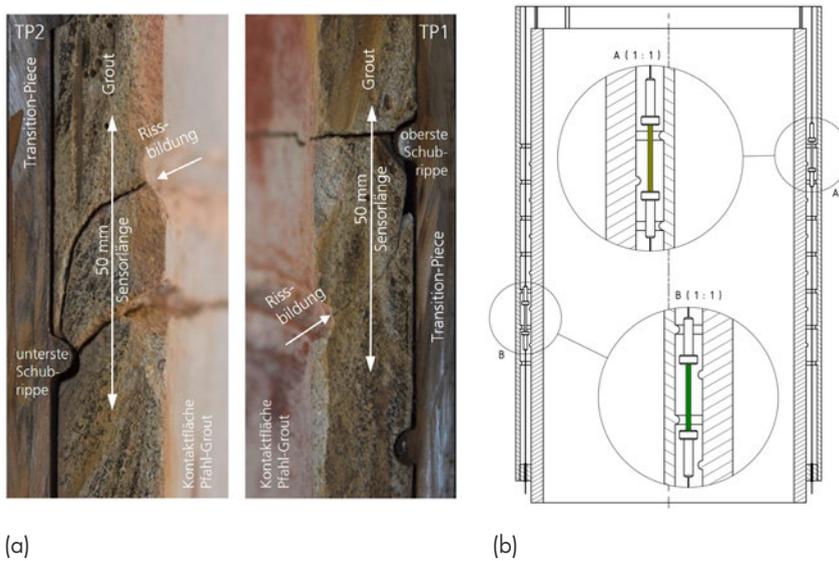


Abb. 12: (a) Exemplarische Risspositionen zwischen den untersten und obersten Schubrippen aus dem Projekt QS-M Grout. (b) Darstellung der daraus abgeleiteten Positionen zweier Sensoren im CAD-Modell.

Die im Grout verbauten FBG-Sensoren sind von MIOPAS in Längen von 50 mm bis 400 mm gefertigt worden. Ihre vorgesehenen Positionen zeigt Abb. 11 (b). Ziel war das Erkennen von Rissen in Bereichen, an denen zum einen ein frühes Auftreten oder ein dauerhaft intaktes Verhalten angenommen werden konnte. Abb. 12 (a) zeigt dazu den

Rissfortschritt an ehemaligen Probekörpern. Abb. 12 (b) stellt die zugehörigen Sensorpositionen im CAD-Modell dar. Die Positionierung der acht Sensoren im Grout-Spalt ist in Abb. 13 gezeigt. Die Darstellung der Sensoren ist analog zu den Zeitverläufen farblich gekennzeichnet.

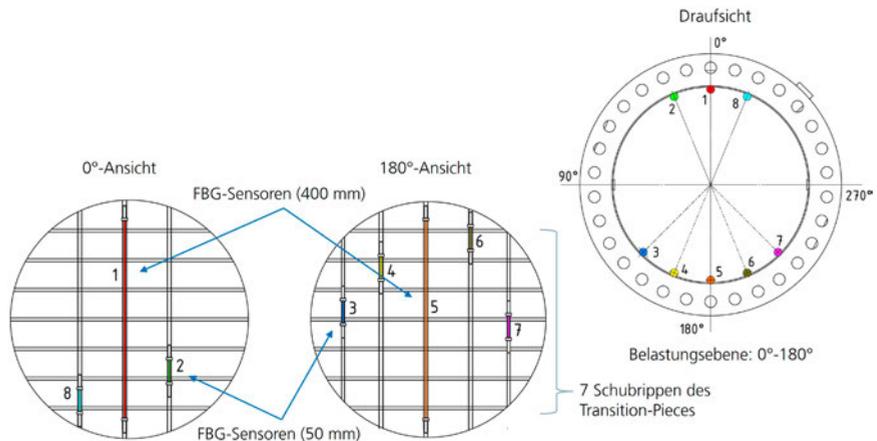


Abb. 13: Sensorpositionierung der Sensoren (1 bis 8) in Draufsicht und Ansicht (0° und 180°) relativ zu den Schubrippen.

4.2. VERSUCHSABLAUF

Beim Schädigungsversuch wurden zwei Transition-Pieces durch zyklische Biegebeanspruchungen bis zum Erreichen signifikanter Schädigungen belastet. Dazu wurden horizontale Wechsellasten am Turm entsprechend Tab. 1 aufgebracht. Für weitere Analysen wurden diese ergänzt durch Referenzbelastungen mit geringerer Amplitude, konstantem Verlauf über 120s oder einer um den Faktor 10 reduzierten Belastungsfrequenz. Nach jeder Belastungsstufe wurde die Struktur mit einem Rauschsignal durch einen Shaker angeregt. Anschließend hat eine Messung im lastfreien Stillstand stattgefunden.

Tab. 1: Belastungsstufen 1 bis 8 im Schädigungsversuch der Grout-Verbindung mit Verschiebungs- bzw. Lastgrößen und Lastwechselfzahlen.

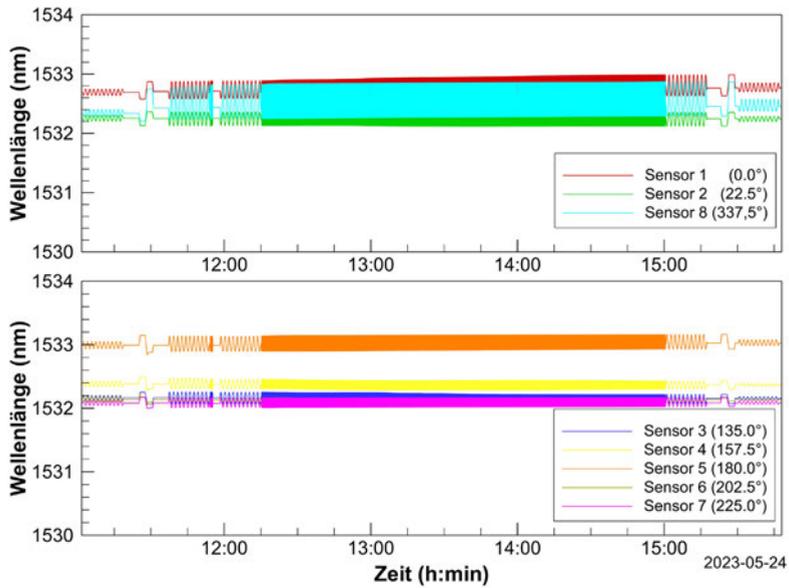
Belastungsstufe	Verschiebungsvorgabe (Last)	Konstante Referenzbelastung	Belastungszyklen bei niedriger Frequenz	Belastungszyklen bei höherer Frequenz
		+/- 15 mm; +/- Zielwert	0,01 Hz	0,1 Hz
1	15,0 mm (25,0 kN)	120 s	2 x 10	1.000
2	30,0 mm (50,0 kN)	120 s	2 x 10	1.000
3	45,0 mm (75,0 kN)	120 s	2 x 10	1.000
4	60,0 mm (95,0 kN)	120 s	2 x 10	1.000
5	62,5 mm (98,5 kN)	120 s	2 x 10	1.000
6	65,0 mm (102,0 kN)	120 s	2 x 10	1.000
7	67,5 mm (105,0 kN)	120 s	2 x 10	1.000
8	70,0 mm (107,5 kN)	120 s	2 x 10	1.000

4.3. ERSTE ERGEBNISSE

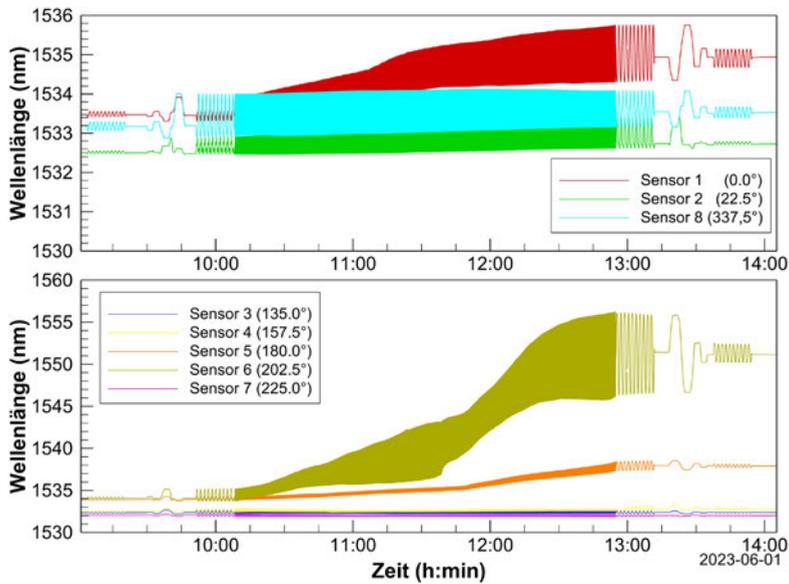
Die Messergebnisse der FBG-Sensoren sind als Wellenlängenänderungen in Abb. 14 für einige relevante Laststufen wiedergegeben. Die Sensoren können Rissaufweitungen bzw. Dehnungen im Sensor in Form von gemessenen Wellenlängenänderungen detektieren. Lokale elastische und rissbeeinflusste und daher zeitversetzt auftretende Dehnungsgrößen werden durch die Sensoren plausibel angezeigt und bereits in frühen Belastungsstufen detektiert.

Gleichzeitig kann festgestellt werden, dass die Sensoren in der Mitte der Verbindung über alle Belastungsstufen hinweg funktionsfähig bleiben. Es ist anzunehmen, dass hier in erster Linie die elastischen Dehnungen im Grout und nur geringe nichtlineare Dehnungen bzw. wenig bis gar keine Rissbildungen aufgetreten sind.

Trotz der relativ großen Beständigkeit der Sensoren gegenüber den auftretenden Belastungen kam es an den hoch belasteten Stellen im oberen und unteren Bereich der Grout-Verbindung zu einzelnen Ausfällen, die im Nachgang des Versuchs im Detail weiter untersucht werden sollen.



(a)



(b)

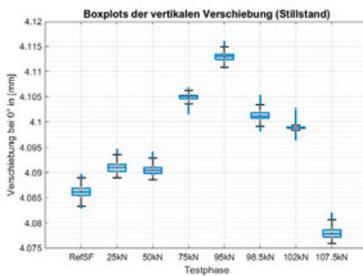
Abb. 14: Grout-Sensorik im Schädigungsversuch: Zeitliche Verläufe der mittels FBG-Sensoren im Grout gemessenen Dehnungen bzw. Rissaufweitungen unter zyklischen Belastungen: Belastungsstufe 1 (a) und Belastungsstufe 4 (b).

Folgende Schadensindikatoren wurden zusätzlich implementiert, um die Schädigung an der Grout-Verbindung zu beschreiben:

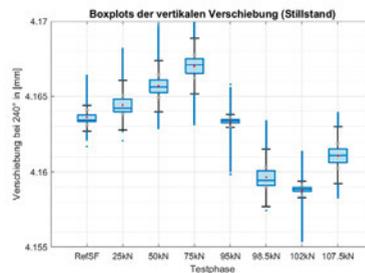
1. Die Schiefstellung der Grout-Verbindung wurde anhand der Daten der Wegsensoren ermittelt. Ausgewertet wurden Stillstandsmessungen nach jeder Belastungsstufe, vgl. Abb. 15.

2. Die Eigenfrequenzen der Gesamtstruktur wurden anhand der Beschleunigungssensordaten durch eine experimentelle Modalanalyse ermittelt. Ausgewertet wurden die Daten während der Shaker-Rauschanregung, welche nach jeder Belastungsstufe durchgeführt wurde, vgl. Veränderung der Eigenfrequenzen in Abb. 16.

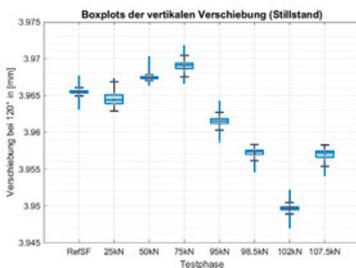
3. Das Verhältnis zwischen der Varianz der Zylinderkraft und der Varianz der Dehnung wurde verwendet, um die Dehnungsverteilung entlang der Grout-Verbindung nach jeder Laststufe zu bewerten. Ausgewertet wurden die Daten aus der Belastung mit 10 Zyklen bei 0,01 Hz, welche nach jeder Laststufe durchgeführt wurden, vgl. Abb. 17.



(a)



(b)



(c)

Abb. 15: Darstellung der Verschiebungsmessungen an den axialen Wegsensoren, welche an der Unterkante der Grout-Fuge bei 0° (a), 120° (b) und 240° (c) installiert sind.

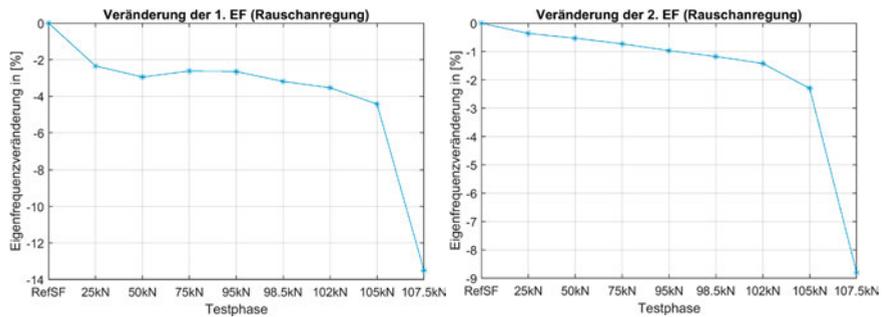


Abb. 16: Veränderung der ersten und zweiten Eigenfrequenz während des Großversuchs.

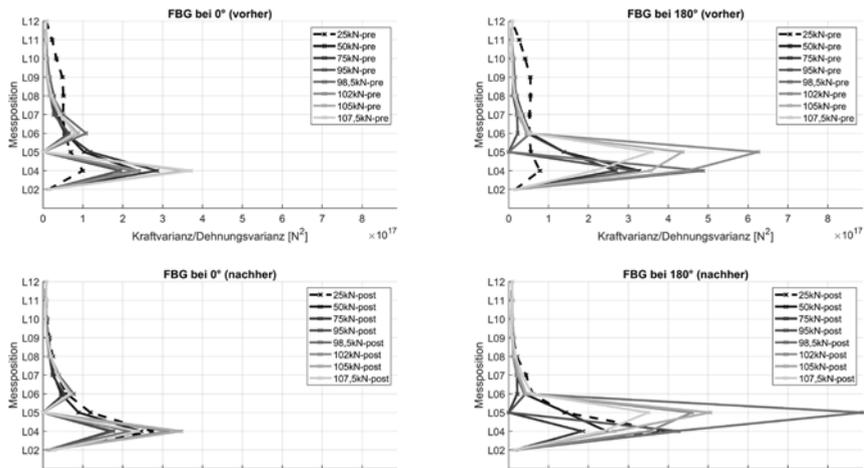


Abb. 17: Verhältnis der Varianzen von Zylinderkraft und Dehnung, auf Basis der Daten der Belastung mit 10 Zyklen bei 0,01 Hz, welche nach jeder Laststufe durchgeführt wurden. Dargestellt werden die Ergebnisse der FBG-Stränge bei 0° (links) und bei 180° (rechts) nach jeder Laststufe. Ebene L02 befindet sich unterhalb und L12 oberhalb der Grout-Fuge. Ebenen L04 bis L10 sind äquidistant und befinden sich um die Schubrippen.

Mit den bisherigen Ergebnissen des Projekts können folgende Aussagen untermauert werden:

- › Das frühzeitige Erkennen von rissbedingten Veränderungen im Dehnungsverhalten im Grout ist mittels FBG-Sensoren möglich. Darüber hinaus lässt sich die zeitliche und räumliche Ausprägung von Schädigungsvorgängen ableiten.
- › Die vertikale Verschiebung tritt anfänglich bei 240° bzw. 120° auf und anschließend in der Hauptbelastungsrichtung bei 0°. Am Ende des Versuches kann eine permanente Schiefstellung in Richtung 180° nachgewiesen werden.
- › Eine signifikante Senkung der ersten Eigenfrequenz findet direkt nach der ersten Laststufe statt. Diese entspricht dem ‚Einsetzen‘ des Systems. Eine weitere erhebliche Abnahme der ersten und zweiten Eigenfrequenz erfolgt ab Laststufe 6.

- › Die integrierten FBG-Sensoren sind in der Lage, Risse zu identifizieren, bevor sich eine durch nichtlineares Strukturverhalten geänderte Tragfähigkeit beobachten lässt.
- › Höhere Dehnungen entstehen bei 180° als bei 0° (Abb. 17). Dies ist in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der vertikalen Verschiebungen. Die Ebenen L04 und L05 werden stärker belastet als die übrigen Ebenen.

Damit stehen neue Methoden zur Beurteilung von Schädigungsvorgängen zur Verfügung. Die Entwicklung von Prognoseverfahren, ihre Anwendung im Modellmaßstab sowie ihre Validierung in detaillierten numerischen Modellen ist Bestandteil laufender Forschungen. Ihr Ziel ist die Anwendung optimierter Verfahren zur Zustands- und Lebensdauerprognose für Grout-Verbindungen in Offshore-Windparks.

5. ZUSAMMENFASSUNG & AUSBLICK

Im Projekt Grout-WATCH konnte gezeigt werden, dass ein frühzeitiges Erkennen von rissbedingten Veränderungen im Dehnungsverhalten des Grout mittels FBG-Sensoren möglich ist. Mit dem Einsatz mehrerer Sensoren kann damit eine zeitliche und räumliche Analyse von Schädigungsvorgängen realisiert werden. Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen erlauben die Annahme, dass Risse bereits in einem sehr frühen Stadium detektiert werden können.

Die im Offshore-Windpark gemessenen Daten können nun mit Daten aus dem Labor korreliert werden. Es kann somit eine verbesserte Aussage über den aktuellen Zustand der Grout-Verbindungen im Windpark abgeleitet und die Vorhersagequalität der Lebensdauer von Offshore-Grout-Verbindungen verbessert werden.

Das Projekt hat vertiefte Erkenntnisse zur Anwendbarkeit der FBG-Grout-Sensorik geliefert und ihre prinzipielle Anwendbarkeit aufgezeigt. Die zukünftige Verwertbarkeit der Sensoren im Rahmen eines Offshore-SHM-Konzepts ist weitergehend zu untersuchen. Eine Verbesserung der Aussagefähigkeit der bestehenden SHM-Sensoren hinsichtlich einer genaueren Lebensdauervorhersage ist aber bereits ableitbar.

LITERATUR

- [1] Schaumann, P.; Lochte-Holtgreven, S. (2011): Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von Grout-Strukturen für Offshore-Windenergieanlagen, final report, Hannover.
- [2] Schaumann, P.; Raba, A.; Bechtel, A. (2016): Zum Ermüdungsverhalten von Grout-Verbindungen bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen, Stahlbau, Vol. 85, Heft 12, 2016, S. 822-827.
- [3] Hoffmann S., Quiroz T., Widerspan V. (2022): Ad-hoc Analyse: Entwicklung der OWEA-Gründungsstrukturen hinsichtlich Gründungsdurchmesser und Kolkmaßnahmen/Flächenversiegelung. Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme IWES, Hannover; Henneberg, J.; Raba, A.; Lohaus, L.; Cotardo, D..
- [4] Bechtel A. (2016): Fatigue Behaviour of Axially Loaded Grouted Connections in Jacket Structures. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.
- [5] Schaumann, P. (2018): Überwiegend axial wechselbeanspruchte Grout-Verbindungen in Tragstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen, final report, Hannover.
- [6] Link, M.; Weiland, M. (2015): Monitoring der Monopile-Gründung einer Offshore Windkraftanlage im EnBW Windpark Baltic 1, in VDI-Berichte Nr. 2244, Düsseldorf.
- [7] VDI (2020): Strukturüberwachung und -beurteilung von Windenergieanlagen und Offshorestationen, VDI 4551:2020-01.
- [8] Petryna, Y. (2011): Structural Health Monitoring für Windenergieanlagen auf hoher See, studiFORUM im DIN, Berlin.
- [9] Anders S. (2007): Betontechnologische Einflüsse auf das Tragverhalten von Grouted Joints. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.
- [10] Schaumann, P.; Raba, A. (2016): Ermüdungsverhalten von kleinskaligen Grout-Verbindungen unter Wasser, https://www.stahlbau.uni-hannover.de/fileadmin/stahlbau/publications/Schaumann__Raba_2016_-_Ermuedungsverhalten_von_kleinskaligen_Grout-Verbindungen.pdf.
- [11] Raba A. (2018): Fatigue behaviour of submerged axially loaded grouted connections. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.
- [12] Kohlmeier, M., Heinrich, D., Spill, S., Collmann, M., Dreger, D., Schossig, T. (2023): Design of a Largescale Model Test to Validate Monitoring Systems for Grouted Connections in Offshore Monopile Foundations. In: Proceedings of the Thirty-third (2023) International Ocean and Polar Engineering Conference, Ottawa, Canada, June 19-23, 2023, pp. 920-926, International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), 2023.

- [13] Friedmann, H.; Häckell, M.; Kohlmeier, M.; Huhn, H.: Großversuche und Feldmessungen als Voraussetzung für die Entwicklung von SHM-Systemen für Tragstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen, in: S. 427 bis 442, in: Messen in der Geotechnik, Braunschweig 2018, (= Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig), Heft 104.
- [14] Häckell, M.; Friedmann, H.; Feulner, M. (2017): Detecting Damage in Grouted-Joints of Wind Turbine Support Structures – Application on a Large-Scale Experiment, in: Proceedings IWSHM, Stanford.

MARKOMP

GENERATIVE FERTIGUNG MARITIMER KOMPONENTEN

AUTOREN

DR.-ING. LARS GREITSCH	MECKLENBURGER METALLGUSS GMBH
CHRISTIAN KLÖTZER-FREESE	MECKLENBURGER METALLGUSS GMBH
TOBIAS KRUSE	MECKLENBURGER METALLGUSS GMBH
MOHAMAD KHALIL	MECKLENBURGER METALLGUSS GMBH
PROF. DR.-ING. WILKO FLÜGGE	FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR GROSSSTRUKTUREN IN DER PRODUKTIONSTECHNIK IGP, UNIVERSITÄT ROSTOCK, LEHRSTUHL FERTIGUNGSTECHNIK
ALEXANDER JENTSCH	FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR GROSSSTRUKTUREN IN DER PRODUKTIONSTECHNIK IGP
PHILIPP ANDREAZZA	FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR GROSSSTRUKTUREN IN DER PRODUKTIONSTECHNIK IGP
KLARA PEJIC	FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR GROSSSTRUKTUREN IN DER PRODUKTIONSTECHNIK IGP
PROF. DR.-ING. HABIL. OLAF KESSLER	UNIVERSITÄT ROSTOCK, LEHRSTUHL WERKSTOFFTECHNIK
DR.-ING. HANNES FRÖCK	UNIVERSITÄT ROSTOCK, LEHRSTUHL WERKSTOFFTECHNIK

EINLEITUNG

Bauteile maritimer Systeme, die Salzwasser ausgesetzt sind, werden häufig aus korrosionsresistenten Bronze-Legierungen gefertigt. Gerade für die Komponenten der Antriebsanlage, wie zum Beispiel Propeller, werden üblicherweise aufgrund der Bauteilgröße und Komplexität Gießverfahren eingesetzt. Der Gießrohling wird mechanisch zum fertigen Produkt weiterverarbeitet. Mit der Entwicklung additiver Fertigungsverfahren (additive manufacturing - AM) erweitern sich die Möglichkeiten der Herstellung solcher Bauteile. Durch die AM können Bauteile mit innen liegenden Hohlstrukturen konzipiert werden. Dies reduziert Bauteilmassen und spart Materialkosten. Zudem können die AM-Technologien die Flexibilität des Fertigungsprozesses erhöhen, da manuelle zeitintensive Aufwände in der Unikatfertigung reduziert werden. Risiken bestehen allerdings durch den Schweißprozess, dass daraus resultierende Materialverhalten des Werkstoffs und die Sicherstellung/Überwachung der Qualität der Bauteile.

In dem Vorhaben wurden additive Fertigungsverfahren für die Fertigung maritimer Komponenten, wie zum Beispiel Propeller, weiterentwickelt und angewendet. Hierzu wurde der Konstruktionsprozess für solche Bauteile so erweitert, dass auch Hohlstrukturen abgebildet

werden können. Für die verwendeten Werkstoffe ist das Verhalten und die Materialkennwerte bei geschweißten festzustellen. Hierfür wurden umfangreiche Werkstoffuntersuchungen durchgeführt und Schweißprozesse erarbeitet. Mit Hilfe einer im Vorhaben entwickelten robotergestützten Versuchsanlage für das WAAM-Verfahren (Wire arc additive manufacturing) wurden darauf aufbauend Propellerflügel aus unterschiedlichen Legierungen als Demonstratoren additiv gefertigt. Das geschaffene Fertigungsverfahren wurde bzgl. Qualität und Wirtschaftlichkeit bewertet.

2. PRODUKTENTWICKLUNG UND GESCHÄFTSMODELLE FÜR ADDITIV GEFERTIGTE KOMPONENTEN

Die Mecklenburger Metallguss GmbH (MMG) beschäftigte sich im Rahmen der Produktentwicklung mit der Ausführung eines Hohlpropellers mit innerer Stützstruktur. Neben der Analyse zur Herstellung verschiedener maritimer Bauteile aus Bronze-Legierungen durch additive Fertigungsverfahren wurden die konstruktiven Potentiale für Propeller mit Hohlräumen und Versteifungsstrukturen untersucht. Insbesondere für die Festlegung der technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen wurden bei der MMG gefertigte Propeller im Größenbereich von 500 mm bis 5.000 mm Durchmesser betrachtet. Im Fokus der Untersuchungen standen die Kosten und Aufwände für die Fertigung im konventionellen Sandgussverfahren und eine Gegenüberstellung der Arbeitsschritte für die gießtechnische sowie additive Prozesskette. Weiterführend konnte für verschiedene Komponenten eine Bewertung des AM-Verfahrens durchgeführt werden, um ein unternehmensseitiges Produktportfolio für additiv gefertigte Bauteile zu definieren. Neben der Umsetzung verschiedener AM-Potentiale für maritime Komponenten ist ein neuartiger Produktentwicklungsprozess mit definierten Schnittstellen erforderlich. So konnten unter der Berücksichtigung verschiedener Design-Restriktionen mehrere Prozeduren für die Konstruktion additiv gefertigter Bauteile im CAD-System erarbeitet werden. Darüber hinaus wurden die bestehenden FEM-Routinen angepasst und die Auslegung maritimer Komponenten sowie die Verifikation durch Festigkeitsnachweise angeglichen. Konkret wurden verschiedene Konstruktionen eines Propellerflügels strukturmechanisch mit Hilfe der FEM-Methodik untersucht, siehe Abb. 1.

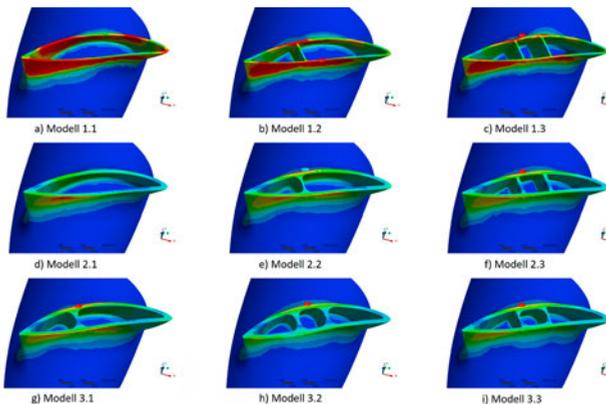


Abb. 1: Festigkeitsüberprüfung verschiedener Querschnittsflächen bezogen auf den zulässigen Grenzwert der Vergleichsspannung, rot: Überschreitung der maximal zulässigen Spannung

Es zeigte sich hierbei, dass große Kantenverrundungen zwischen den Propellerwänden und der inneren Struktur einen bedeutenden Beitrag zur Festigkeit des Bauteils einbringen, während eine einfache Stegaufdickung deutlich geringere Erfolge erzielt. Die Effizienz der verschiedenen Strukturen wurde anhand eines Verhältnisses von Materialerhöhung zu Festigkeitserhöhung in Bezug auf den Hohlpropeller definiert. Jedoch ist auch die Umsetzung einer Hohlstruktur stark abhängig von der lokalen Blattschnittdicke. Im Flügelspitzenbereich ist selten eine hohle Struktur umsetzbar. Ferner ist für den Übergangsbereich zwischen der Massivstruktur und der Hohlstruktur eine parametrische Modellierung zwingend erforderlich, die auch die spezifischen Materialeigenschaften sowie Fertigungsmöglichkeiten berücksichtigt. Schwerpunktmäßig wurden Designstudien unterschiedlicher Propeller, Propellerhauben mit Flossendesign, Reparaturspitzen sowie Flügelstrukturen für Gezeitenkraftwerksturbinen durchgeführt und bewertet.

Innerhalb des Forschungsvorhabens wurden die Entwicklungen und Untersuchungen an mehreren Demonstratoren untersucht, die eine Vielzahl an geometrischen Besonderheiten aufweisen. Dazu zählen beispielsweise unterschiedliche Wandstärken, die Ausführung des Bauteils als Vollmaterial oder Hohlstruktur, mit und ohne Stütz- und Versteifungsstrukturen sowie variierende Radien und Überhänge. Die nachfolgende Abb. 2 stellt einen ausgewählten Propeller im Superyachtbereich dar. Mit einem Durchmesser von ca. 1.200 mm und 4 Flügeln wurde dieser auf der einen Seite im konventionellen Sandgussverfahren und auf der anderen Seite hybrid mittels einer gegossenen Nabe und im WAAM-Verfahren gefertigte Flügel hergestellt.

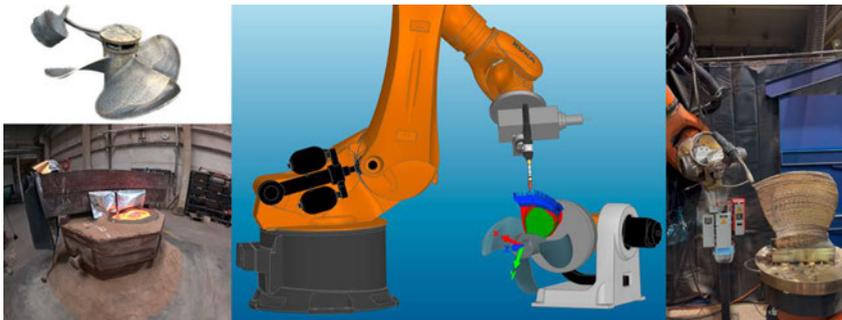


Abb. 2: links: Gussrohling und Abguss im konventionellen Sandgussverfahren; Mitte: Simulation der Werkzeugbahnen für das Auftragsschweißen eines additiv gefertigten Propellers; rechts: WAAM eines Einzelflügel im Versuchsaufbau

Während der Untersuchung unterschiedlicher Parametersätze für das Schweißen sowie für das Fräsen wurden Prozesszeiten und resultierende Kosten ermittelt. Eine anschließende Kategorisierung unterschiedlicher Schweißjobs in Abhängigkeit der Auftragsrate und unterschiedliche Fräswerkzeuge für die Bearbeitung verschiedener Bauteilbereiche konnten den einzelnen Prozessschritten zugeteilt werden. Ferner ist nun eine kosten- und zeitoptimierte Auswahl an Bearbeitungsschritten für die Herstellung unterschiedlicher Bauteilgeometrien möglich. Mit der Demonstratorfertigung konnten abschließend die Aufwände einzelner Pro-

zessschritte bei der additiven Fertigung und der konventionellen Fertigung im Sandguss einander gegenübergestellt werden. Auch wurden für die Validierung des Demonstrators die spezifischen Materialeigenschaften und die Fertigungsmöglichkeit aufgrund unterschiedlicher Schweiß- sowie Fräsparametersätze in den Designprozess zurückgeführt.

3. ROBOTERGESTÜTZTE BEARBEITUNGSZELLE UND ADDITIVE PROZESSKETTE

Die Projektpartner MMG und das Fraunhofer Institut IGP befassten sich im Vorhaben mit der Entwicklung einer robotergestützten Bearbeitungszelle zum Auftragsschweißen, der mechanischen Zwischenbearbeitung sowie mit der Ausarbeitung einer additive Prozesskette maßgeschneidert für die Herstellung von Schiffspropeller und anderen maritimen Komponenten.

3.1. Entwicklung unterschiedlicher Anlagenkonzepte und Umsetzung im Versuchsaufbau

Durch die Betrachtung der einzelnen Prozessschritte in einer additiven Prozesskette und dem Abgleich der parametrischen Prozesseigenschaften mit den angestrebten Produkteigenschaften wurden mögliche Fertigungstechnologien identifiziert und die Anforderungen an die einzelnen Anlagenkomponenten und herzustellende Produkte abgeleitet. Die Anforderungen können in Prozess- und Systemanforderungen unterschieden werden. Die Prozessanforderungen an das Gesamtsystem umfassen den Werkstoff des Bauteils, die Art des Fertigungsverfahrens, die Geometrie der additiv gefertigten Bauteile, die Prozesssicherheit und Reproduzierbarkeit sowie die Fertigungszeit. Die Systemanforderungen umfassen die Automatisierung, die Funktionssicherheit und Verfügbarkeit, die Flexibilität hinsichtlich des Bauteilspektrums und die Integrationsmöglichkeiten in die Fertigungsumgebung der Gießerei. Aus der Produktionsphase ergeben sich u.a. folgende Anforderungen: Auswahl der Software, Auswahl des Industrieroboters, zusätzliche Freiheitsgrade (z. B. Dreh-Kipp-Positioniertisch), Anlagengröße, notwendige Sensorik, Auswahl der Schweißart und der Schweißausrüstung. Diese Anforderungen wurden auch bei der Entwicklung eines Anlagenkonzepts berücksichtigt. Insgesamt wurden drei Konzepte erarbeitet und in einem Entwurf finalisiert. Das erste Konzept umfasst einen Roboter mit mehreren Drehkipppositioniereinheiten, auf denen die verschiedenen Bauteile gefertigt werden können. Ein Werkzeugwechselsystem ermöglicht zudem die subtraktive Bearbeitung der Zwischenlagen mit unterschiedlichen Werkzeugen, beispielweise durch Fräsen. Im zweiten Konzept befinden sich die verschiedenen Drehkipppositionierer im Mittelpunkt und zwei Roboter auf Linear-einheiten, die an den verschiedenen Stationen eine Schweiß- oder Fräsaufgabe am jeweiligen Bauteil ausführen können. Im dritten Anlagenkonzept wurde ein alternativer Ansatz für die Nutzung des Industrieroboters verfolgt. Hierbei wird nicht das Werkzeug, sondern das Werkstück selbst geführt. Daher sind sowohl die Frässtation als auch die Schweißstation stationär angeordnet.

Innerhalb des Projektzeitraums wurde eine Versuchsanlage zur additiven Fertigung durch WAAM umgesetzt. Die ausgewählten Anlagenkomponenten sind ein Knickarmroboter KR500 der Firma KUKA, eine MSG-Schweißausrüstung der Firma Fronius mit einem Standard-Puls-MIG-Lichtbogen und einer Lichtbogenkamera ArcView2, ein DKP-400 der Firma

KUKA, ein Laser-Profil-Scanner LLT2960-100/BL der Firma Micro-Epsilon Messtechnik und ein ARAMIS-System der Firma GOM. Die nachfolgende Abb. 3 stellt einen Ausschnitt der Bearbeitungszelle im Rahmen einer Untersuchung von unterschiedlichen Werkzeugbahnen an Einzelflügeln dar.



Abb. 3: Erprobung unterschiedlicher Werkzeugbahnen zum Auftragsschweißen in der Versuchsanlage bei der MMG

3.2. Additive Prozesskette

Bei der additiven Fertigung von großformatigen Bauteilen ist eine Anpassung bzw. Erweiterung der klassischen Prozesskette notwendig. Die additive Prozesskette umfasst drei Phasen: die Entwicklungsphase (Preprocessing), die Produktionsphase (Production) und die Nachbearbeitungsphase (Postprocessing). Die erste Phase, die Entwicklungsphase, besteht aus der CAD-Konstruktion, CAE-Simulation und dem Datenaustausch. Die CAD-Konstruktion und Simulation mit CAE-Werkzeugen ist ein iterativer Prozess, der insbesondere bei der additiven Fertigung aufgrund des hohen Optimierungspotenzials mehrere Wiederholungen durchläuft. Am Ende der Entwicklungsphase steht der Datenaustausch in Form von CAD-Formaten (STEP, IGES, STL), die in den nachfolgenden Prozessschritten weiterverarbeitet werden können. Die zweite Phase, die Produktionsphase, umfasst die Vorbereitung für den WAAM-Prozess, die Prozessüberwachung und die Zwischenbearbeitung. Die Vorbereitung beschreibt die Erstellung des Roboterprogramms durch Offline-Programmierung. In diesem Schritt findet auch der aus dem 3D-Druck bekannte Slicing-Prozess statt. Dabei werden die in der Produktion zu verarbeitenden Schichten entsprechend den produkt-, material- und prozessspezifischen Anforderungen erzeugt. Es folgen die additive Fertigung und die Prozessüberwachung, bei der der Prozess zur Sicherstellung einer fehlerfreien Produktion überwacht wird. Abhängig von der Geometrie und den Werkstoffparametern des Schweißprozesses ist eine mechanische Bearbeitung der Zwischenlagen erforderlich. Der Überwachungsprozess garantiert, dass diese so gering wie möglich ausfallen. In der Nachbearbeitungsphase erfolgt die mechanische Endbearbeitung durch Schleifen, Fräsen und Entfernen von Hilfsstrukturen. Abschließend erfolgt die Qualitätssicherung, die die Dokumentation des fertigen Bau-

teils so durchführt, dass das fertige Bauteil mit allen Produktunterlagen ausgeliefert werden kann. Die additive Prozesskette ist in Abb. 4 dargestellt.

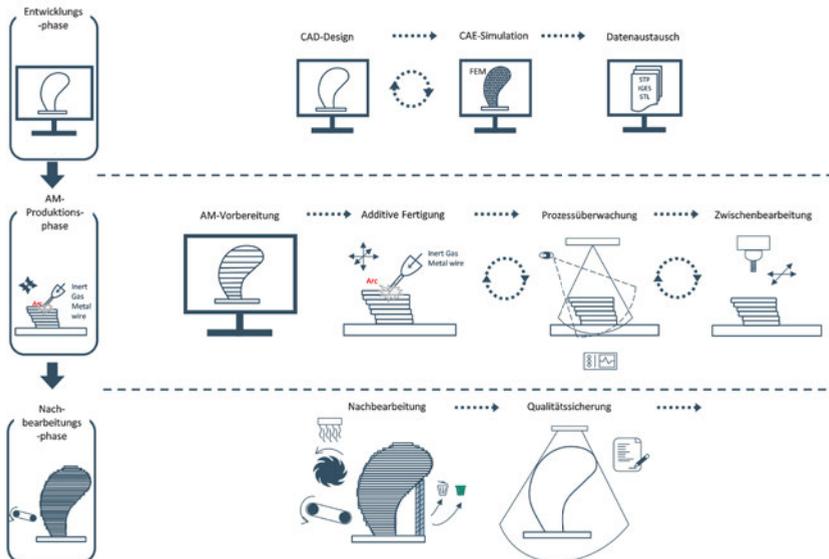


Abb. 4: angepasste hybride Prozesskette zum Auftragsschweißen von Schiffspropeller

Viele Prozessschritte wurden innerhalb des Vorhabens durch umfangreiche Untersuchungen verschiedener Bauteilbereiche des Schiffspropellers validiert. Beginnend mit der Aufbereitung der CAD-Daten nach der Simulation konnten eine Vielzahl an Bearbeitungsstrategien für das Auftragsschweißen und Fräsen mit diversen Werkzeugen als Zwischenbearbeitungsprozess erprobt werden. Durch die Fertigung mehrerer Versuchskörper mit repräsentativen Bauteileigenschaften und einer anschließenden Vermessung mittels 3D-Scanner wurden diese bewertet.

4. VERFAHRENTWICKLUNG DES AUFTRAGSSCHWEISSENS UND DEREN QUALITÄTSMANAGEMENT

Im Rahmen des Verbundprojektes wurden durch das Fraunhofer-Institut IGP und der MMG die Schweißzusätze CuAl8Ni2Fe2Mn2 , CuAl9Ni5Fe3Mn2 und CuMn13Al8Fe3Ni2 für die additive Fertigung von Schiffspropeller untersucht. Die robotergestützten Schweißungen wurden auf Substratplatten aus EN 1982 CC333G CuAl10Fe5Ni5C durchgeführt. Es wurden zwei verschiedene Lichtbogenmodifikationen von Fronius untersucht. Dabei handelt es sich zum einen um den Pulse Multi Control (PMC), einem Pulsprozess mit minimalem Kurzschlussstrom im Tropfenübergang. Zum anderen wurde der Cold Metal Transfer (CMT) genutzt, ein Kurzlichtbogen, welcher sich durch eine aktive, mechanische Rückbewegung des Schweißdrahtes während der Kurzschlussphase auszeichnet und somit den Energieeintrag in das Bauteil verringert.

Die Tab. 1 gibt die Massenanteile der Hauptlegierungselemente der untersuchten Kupferbronzen in % wieder, sowie deren Zusammensetzung laut entsprechender Normung. Die chemische Zusammensetzung wurde mittels optische Emissionsspektroskopie (OES) ermittelt.

Tabelle 1: Massenanteile der Legierungselemente der untersuchten Legierungen in %

Werkstoff	Analyse/ Normung	Legierungselemente in Masse %				
		Al	Fe	Ni	Mn	Cu
CuAl10Ni5Fe5	OES	9,67	4,99	4,77	1,36	78,86
	DIN EN 1982	8,5 - 10,5	4,0 - 5,5	4,0 - 6,0	≤ 3,0	76,0 - 83,0
CuMn13Al8Fe3Ni2	OES	7,1	2,3	2,3	11,9	
	DIN EN ISO 24373	7,0 - 8,5	2,0 - 4,0	1,5 - 3,0	11,0 - 14,0	Rest
CuAl9Ni5Fe3Mn2	OES	9,0	3,4	5,0	1,0	
	DIN EN ISO 24373	8,5 - 9,5	3,0 - 5,0	4,0 - 5,5	0,6 - 3,0	Rest
CuAl8Ni2Fe2Mn2	OES	8,2	1,7	2,0	1,8	
	DIN EN ISO 24373	7,0 - 9,5	0,5 - 2,5	0,5 - 3,0	0,5 - 2,5	Rest

Im Rahmen der Prozessoptimierung wurden unterschiedliche Schweißstrategien für den Nahtanfang, das Nahtende, für Nahtkreuzungspunkte und Bahnführungsbewegungen (linear, pendelnd, alternierend) untersucht. Hierbei standen die Aufbauraten, die Nahtgeometrien und daraus resultierende innere Schweißnahtunregelmäßigkeiten im Fokus. Die nachfolgende Abb. 5 stellt einen Auszug verschiedener Schweiß- und Bahnplanungsstrategien gegenüber.

Zur Ermittlung der mechanisch-technologischen Eigenschaften wurden Wandstrukturen für die drei Schweißzusätze mittels PMC- und CMT-Verfahren hergestellt. Pro Schweißlage wurden zwei Schweißraupen nebeneinandergesetzt und die Schweißfolge alterniert. Um eine Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften bestimmen zu können, wurden Flachzugproben in vier verschiedenen Orientierungen aus der Struktur entnommen. Zusätzlich zur statischen Festigkeit und Duktilität wurde die absorbierte Kerbschlagarbeit in zwei Orientierungen geprüft. Für Proben, welche mittels CMT-Lichtbogen mit identischen Schweißparametern und Zwischenlagentemperaturen geschweißt wurden, konnten folgende Ergebnisse festgehalten werden.



Abb. 5: verschiedene Füllstrategien beim Auftragsschweißen für den Übergang zwischen Propellerflügel und Nabe

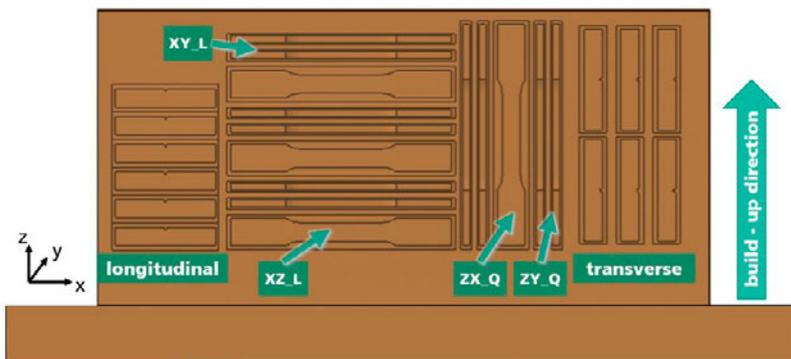


Abb. 6: Probenentnahmeplan für Zugversuchsproben und V-Kerbschlagproben aus der Wandstruktur

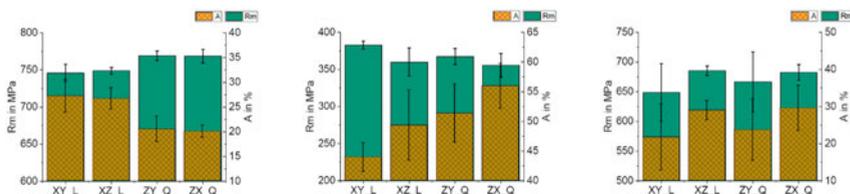


Abb. 7: Zugfestigkeit und Bruchdehnung der einzelnen Probenorientierungen; links: CuMn13Al8Fe3Ni2, Mitte: Cu-Al8Ni2Fe2Mn2, rechts: CuAl9Ni5Fe3Mn2

Die Zugfestigkeit von Proben aus CuMn13Al8Fe3Ni2, die quer zur Aufbaurichtung entnommen wurden, weist tendenziell höhere Werte auf als Zugproben, die in Schweißrichtung

entnommen wurden. Die Bruchdehnungen verhalten sich entsprechend umgekehrt, sodass in Längsrichtung entnommene Proben die bessere Duktilität aufweisen. Bei auftragsgeschweißten Strukturen aus Cu-Al8Ni2Fe2Mn2 sind nur marginale Unterschiede im Festigkeitsverhalten der verschiedenen Entnahmerichtungen zu beobachten, wobei das Festigkeitsniveau im Vergleich zu den anderen Schweißzusatzwerkstoffen deutlich niedriger ist. Allerdings sind Einflüsse auf die Duktilität zu erkennen, sodass quer entnommene Zugproben die größere Verformbarkeit aufweisen. Unter Berücksichtigung der vorliegenden Streuung der Messwerte kann für die geschweißte Struktur mit Cu-Al9Ni5Fe3Mn2 keine Richtungsabhängigkeit festgestellt werden. Zur Analyse der Schwingfestigkeit auftragsgeschweißter Strukturen wurden je Schweißzusatz zwei verschiedene Probengeometrien in zwei Orientierungen im Wöhlerversuch geprüft.

Die beim Auftragsschweißen lokal eingebrachte Wärmeenergie führt beim Abkühlen zum Verzug und zu verbleibenden Eigenspannungen im Bauteil. Durch den Aufbau eines Prüfstands konnte der Verzug und das sich ergebende Eigenspannungsprofil analysiert und zwischen den Schweißzusätzen und Schweißstrategien verglichen werden. Es zeigte sich, dass die Manganbronze tendenziell höhere Verzugkräfte als die Aluminiumbronze hervorbringt. Zusätzlich dazu wurden bei der Fertigung von Wandstrukturen die auftretenden Deformationen mit einem GOM ARAMIS 6M-Kamerasystem erfasst und mittels GOM ATOS Triple Scan validiert.

Da der Einsatz maritimer Strukturen in korrosiven Umgebungen wie Meerwasser vorgesehen ist, wurde das Korrosionsverhalten der Schweißzusätze in Abhängigkeit von den Lichtbogenmodifikationen mittels Dauertauchversuchen untersucht. Die auftragsgeschweißten Probekörper wurden künstlichem Meerwasser ausgesetzt. Prinzipiell sind Unterschiede zwischen den Schweißzusätzen zu erkennen. So zeigt sich, dass die beiden Mehrstoffbronzen mit einem Aluminiumgehalt von 8 Gew.-% einen deutlich höheren Materialverlust aufweisen als der Schweißzusatzwerkstoff mit einem höheren Aluminiumgehalt von 9 Gew.-%. Es ist kein systematischer Einfluss der Lichtbogenmodifikation zwischen CMT und PMC zu erkennen.

Die hohe, periodische Energieeinbringung ist ein limitierender Faktor bezüglich der Produktivität des WAAM-Verfahrens, da die Zwischenlagentemperatur nicht beliebig hoch gewählt werden darf. Dies hätte sowohl technologische Gründe wie z.B. Geometrieabweichungen und Beeinflussungen des Mikrogefüges zur Folge. Aus diesem Grund wurden aktive Kühlstrategien untersucht. Thermische Simulationen wurden begleitend in ANSYS Mechanical berechnet. Es wurden Schweißversuche im umwälzgekühlten Wasserbad durchgeführt, bei welchen der Wasserpegel auf unterschiedlichen Höhen relativ zum Schmelzbad lag. Die Abkühlzeit auf eine Zwischenlagentemperatur auf 150 °C konnte um etwa 10 min reduziert werden. Zusätzlich bewirkt der Einsatz der Kühlung ein gleichmäßigeres Nahtaussehen.

Die geometrische Form eines Propellerblattes ist in allen drei Dimensionen definiert und stellt somit hohe Anforderungen an die schweißtechnische Fertigung. Aus diesem Grund wurden Versuche durchgeführt, um die Schweißbarkeit von gekippten Strukturen zu untersuchen. Es zeigte sich, dass der Brennerwinkel einen entscheidenden Einfluss auf das resultierende

Nahtprofil hat. So führt beispielsweise die Neigung des Brenners analog zum Winkel der Wandstruktur zu einem gleichmäßigeren Nahtprofil als die senkrechte Wannenposition. Des Weiteren weist die zur Substratplatte hin geneigte Seite eine deutlich größere Welligkeit auf als die Oberseite. Eine Schrägstellung des Brenners führt somit zu einem größeren tragenden Querschnitt.

Während der Fertigung eines Demonstratorbauteils werden insitu die Strom- und Spannungsverläufe während des Schweißprozesses gemessen und dokumentiert, sowie das Nahterscheinungsbild mithilfe einer Prozess-Kamera protokolliert. Standardmäßige zerstörungsfreie Prüfungen erfolgen nach dem Schweißprozess.

5. WERKSTOFFANALYTIK

Der Lehrstuhl Werkstofftechnik der Universität Rostock beschäftigt sich im Rahmen des Forschungsvorhabens umfassend mit der Analytik des Werkstoffverhaltens der Schweißzusatzwerkstoffe sowie einer Gusslegierung als Referenz.

5.1. Charakterisierung der Ausscheidungsvorgänge sowie Mikro- & Nano-Strukturanalytik Differential Scanning Calorimetry

Für die insitu Charakterisierung der Ausscheidungsvorgänge während unterschiedlicher Wärmebehandlungen wurde die Differential Scanning Calorimetry (DSC) mit verschiedenen Abkühlraten genutzt. Eine detaillierte Beschreibung der DSC kann in [2] und eine Beschreibung der Auswertung kann [4] entnommen werden. Nach dem Lösungsglühen wurde linear mit variierenden Raten abgekühlt. Es wurden zwei Hochtemperaturkalorimeter verwendet, das Setaram Multi HTC sowie das Setaram LabSys Evo DSC. Im weiteren Verlauf wird sich auf die Legierung CuAl10Ni5Fe5 als Vertreter der Gusslegierung, sowie CuMn13Al8Fe3Ni2 für den WAAM-Prozess konzentriert.

Abb. 8 zeigt die DSC-Abkühlkurven der beiden Legierungen nach dem Lösungsglühen. Die Abkühlkurven müssen von hohen zu geringen Temperaturen, also von rechts nach links gelesen werden. Es wird deutlich, dass bei beiden Legierungen eine Vielzahl verschiedener sich überlappender Ausscheidungsreaktionen gemessen werden. Bei der Legierung Cu-Al10Ni5Fe5 (s. Abb. 8A) zeigt sich während der Abkühlung mit einer Rate von 0,01 K/s die erste Reaktion bei etwa 980 °C. Anschließend erscheint ein sehr scharfer Peak mit einer Spitzentemperatur bei etwa 920 °C. Danach überlagern sich bis etwa 210 °C mehrere exotherme Peaks, wobei der Großteil der Ausscheidungen zwischen 980 °C und ca. 600 °C gebildet werden.

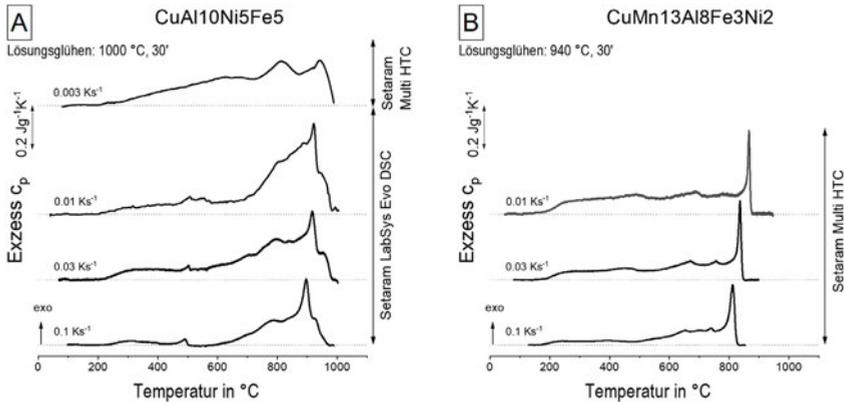


Abb. 8: DSC- Abkühlkurven der Legierungen A: CuAl10Ni5Fe5 nach einem Lösungsglühen bei 1000 °C für 30 min und B: CuMn13Al8Fe3Ni2 nach einem Lösungsglühen bei 940 °C für 30 min

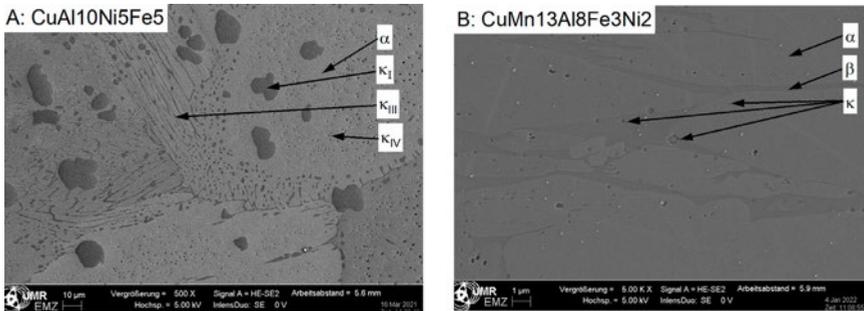


Abb. 8B zeigt die Abkühlkurven der Legierung CuMn13Al8Fe3Ni2. Charakteristisch für diese Legierung ist der sehr scharfe exotherme Peak bei ca. 870 - 850 °C, gefolgt von einer weiteren Abfolge von sich überlappenden exothermen Ausscheidungspeaks. Der scharfe exotherme Peak zeigt wahrscheinlich den Umwandlungsbeginn von der Hochtemperaturphase β -Cu in die α -Cu-Phase. Weiterhin zeigt sich, dass die einzelnen Peaks mit steigender Abkühlrate zu geringeren Temperaturen verschoben werden und die Peakintensität abnimmt. Dies legt nahe, dass der Volumenanteil der Ausscheidungen mit steigender Abkühlrate abnimmt.

Mikroskopie

Abb. 9 zeigt rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der beiden Legierungen. Bei der Legierung CuAl10Ni5Fe5 im gegossenen Zustand wird deutlich, dass das Gefüge aus der α -Cu-Matrix mit unterschiedlichen κ -Ausscheidungen besteht. Besonders deutlich sind die großen unregelmäßig geformten κ_I -Ausscheidungen mit Abmessungen bis 30 μm zu erkennen. Weiterhin wird ein lamellares Gefüge mit κ_{III} -Ausscheidungen an den Korngrenzen, sowie kleine globulare κ_{IV} -Ausscheidungen werden im Kornzentrum sichtbar. Die Bezeichnung der Ausscheidungen erfolgt nach [2]. Abb. 2B. zeigt das Gefüge der Legierung CuMn13Al8Fe3Ni2 im WAAM-gefertigten Zustand. Das Gefüge besteht hauptsächlich aus nadeligen α -Cu-Körnern, die von einer β -Cu-Matrix umgeben sind. Die κ -Ausscheidungen sind mit maximal 0,5 μm deutlich kleiner als die Ausscheidungen in der CuAl10Ni5Fe5 (unterschiedliche Vergrößerung beachten). Die unterschiedlichen κ -Ausscheidungen der Legierung sind in [4] näher beschrieben.

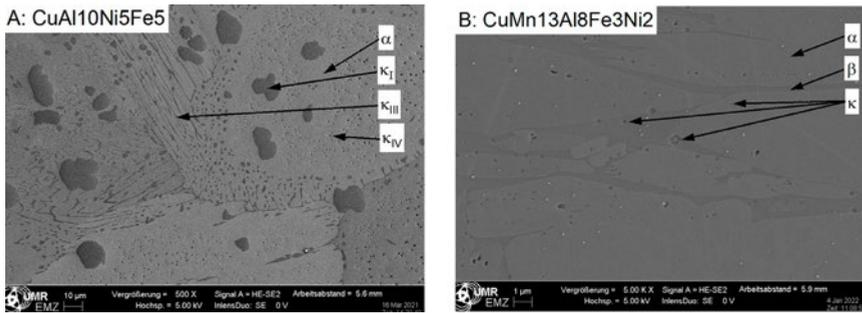


Abb. 9: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen A) der Legierung CuAl10Ni5Fe5 im gegossenen Zustand; B) CuMn13Al8Fe3Ni2 im WAAM gefertigten Zustand

5.2. Untersuchung des mechanischen Verhaltens

Die DSC-Messungen haben gezeigt, dass die Ausscheidungen von der Abkühlgeschwindigkeit beeinflusst werden. Dadurch werden auch die mechanischen Eigenschaften der Legierungen beeinflusst, wie die Härteverläufe in Abb. 3 beispielhaft zeigen. Für diese Untersuchungen wurden Proben entweder im DSC (0,01 – 0,1 K/s) oder im Abschreckdilatometer Bähr 805 A/D [6] (0,3 – 100 K/s) linear abgekühlt. Es wird deutlich, dass die Härte bei beiden Legierungen mit steigender Abkühlrate zunimmt. Bei der Legierung CuAl10Ni5Fe5 lässt sich die Härte von 160 HV1 bei 0,01 K/s auf 344 HV1 bei 100 K/s mehr als verdoppeln. Auch bei der Legierung CuMn13Al8Fe3Ni2 steigt die Härte von 135 HV1 bei 0,01 K/s auf 225 HV1 bei 100 K/s deutlich an. Die Härte des WAAM-gefertigten Zustandes wird auch durch die hohen Abkühlraten nicht erreicht.

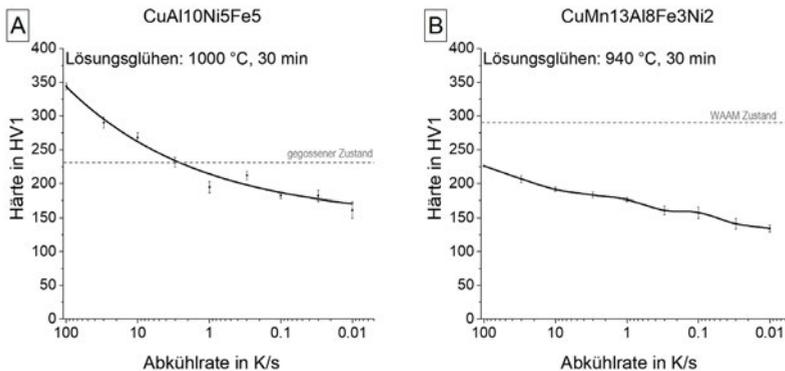


Abb. 10: Härteentwicklung in Abhängigkeit der Abkühlrate nach einem Lösungsglühen, A) der Legierung CuAl10Ni5Fe5 und B) CuMn13Al8Fe3Ni2

Zugversuche wurden ebenfalls in einem Abschreck- und Umformdilatometer mit einer angepassten Zugprobengeometrie durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in [7] detailliert beschrieben. Abb. 4A zeigt die Ergebnisse von Warmzugversuchen der Legierung Cu-Al10Ni5Fe5 auf unterschiedlichen Temperaturen. Dafür wurden die Proben mit 0,03 K/s auf eine Temperatur erwärmt und dort gezogen. Es wird deutlich, dass die Festigkeiten mit

steigender Temperatur abnehmen. Weiterhin wird deutlich, dass auch die Bruchdehnung mit steigender Temperatur abnimmt und erst ab ca. 400 °C wieder ansteigt. Dies muss bei einer nachgelagerten Wärmebehandlung beachtet werden.

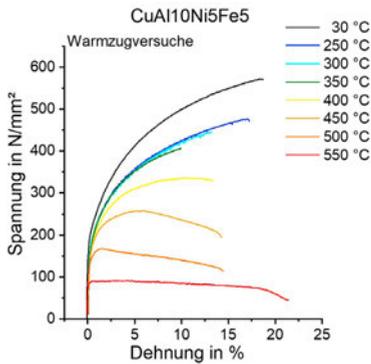


Abb. 11: Spannungs-Dehnungskurven der Legierung CuAl10Ni5Fe5 auf unterschiedlichen Temperaturen

5.3. Untersuchung zur nachgelagerten Wärmebehandlung

Eine nachgelagerte Wärmebehandlung der Bauteile kann die mechanischen Eigenschaften weiter verbessern. Abb. 5 zeigt den Härteverlauf der Legierung CuAl10Ni5Fe5 nach einem Lösungsglühen mit anschließender Wasserabschreckung während der Warmauslagerung bei unterschiedlichen Temperaturen. Es wird deutlich, dass eine Warmauslagerung bei 200 °C zu einer langsamen Härtezunahme auf 440 HV1 nach 24 h führt. Eine Auslagerung bei 300 °C führt zu einer deutlich schnelleren Härtezunahme. Die Härte bleibt dann für mehrere Stunden auf einem hohen Niveau. Die Auslagerung bei 400 °C resultiert in einer schnellen Härtesteigerung auf ca. 450 HV1 mit einer anschließenden langsamen Härteabnahme. Die Auslagerung bei 500 °C führt schon durch die Erwärmung zu einer sehr hohen Härte (483 HV1 beim Erreichen von 500 °C). Anschließend kommt es zu einer Überalterung, wodurch die Härte schnell auf ca. 300 HV1 sinkt.

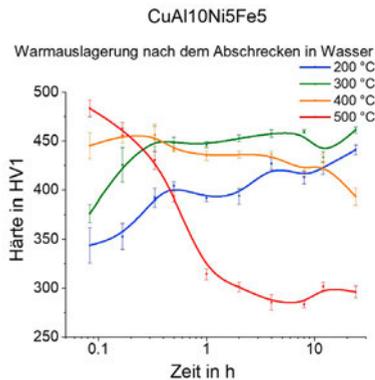


Abb. 12: Härteverlauf der Legierung CuAl10Ni5Fe5 nach einem Lösungsglühen mit anschließender Wasserabschreckung während der Warmauslagerung

In Kombination mit den Warmzugversuchen liefern diese Ergebnisse wertvolle Erkenntnisse für die Gestaltung einer passenden Wärmenachbehandlung. Hierbei können Temperaturen von 300 °C über mehrere Stunden oder alternativ 400 °C für etwa 0,5 Stunden in Betracht gezogen werden. Durch diese Behandlung ließen sich die Eigenspannungen nach einer raschen Abkühlung abbauen und zugleich die Festigkeit weiter steigern.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen des Verbundprojekts konnte umfassendes Wissen im Bereich additiver Fertigung mit WAAM bzw. DED-arc sowie über das Werkstoffverhalten unterschiedlicher Kupferbronzen im maritimen Bereich generiert werden. Die gewonnenen Erkenntnisse tragen langfristig dazu bei, das Fertigungsverfahren am Markt zu etablieren. Darüber hinaus lieferten die Untersuchungen zum Werkstoffverhalten einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der Gefügezusammensetzung. Über das Vorhaben hinaus kann dies beispielsweise im Bereich der Propellerreparatur und der hybriden Fertigung durch Kombination von Gussrohlingen mit Verbindungsschweißungen genutzt werden. Die additive Fertigung im Zusammenspiel mit der Digitalisierung der Produktentwicklung und Produktion kann für zukünftige Anwendungen im maritimen Bereich ein großes Potential darstellen. Die im Projektverlauf erreichten Ergebnisse stellen für die einzelnen Projektpartner die Basis für weiterführende Entwicklungsaktivitäten dar.

LITERATUR

- [1] P. Andreazza, A. Gericke, C. Klötzer-Freese und K.-M. Henkel, „Investigations on WAAM using copper-based alloys for ship propeller manufacturing,“ in The 33rd International Ocean and Polar Engineering Conference, Ottawa, Canada, 2023.
- [2] F. Hasan, A. Jahanafrooz, G. Lorimer und N. Ridley, „The morphology, crystallography, and chemistry of phases in as-cast nickel-aluminum bronze,“ *Metallurgical Transactions A*, Nr. 13, pp. 1337-1345, 1982.
- [3] C. Schick und V. Mathot, *Fast Scanning Calorimetry*, Cham: Springer, 2016.
- [4] H. Meigh, *Cast and Wrought Aluminium Bronzes - Properties, Processes and Structure*, London: CRC Press, 2000.
- [5] J. Osten, B. Milkereit, C. Schick und O. Kessler, „Dissolution and Precipitation Behaviour during Continuous Heating of Al-Mg-Si Alloys in a Wide Range of Heating Rates,“ *Materials*, Bd. 8, Nr. 5, pp. 2380-2848, 2015.
- [6] M. Reich, J. Osten, N. Kozlov und O. Kessler, „Thermo-mechanical simulation of laser beam assisted clinching for high-strength steel,“ in 5th International Conference on Thermal Process Modeling and Computer Simulation American Society for Metals, Orlando, FL, USA, 2014.
- [7] J. Osten, P. Söllig, M. Reich und O. Kessler, „Softening of High-Strength Steel for Laser Assisted Clinching,“ *Advanced Materials Research*, Nr. 996-967, pp. 617-627, 2014.
- [8] C. Rowolt, B. Milkereit, J. Broer, A. Springer und O. Kessler, „Continuous Heating Dissolution and Continuous Cooling Precipitation Diagrams of a Nickel-Titanium Shape Memory Alloy,“ *Shape Memory and Superelasticity*, Nr. 7, pp. 541-549, 2021.

MARTERA-FLEXIMAN

FLEXIBLE ADDITIVE MANUFACTURING FOR COMPETITIVE MARITIME COMPONENTS

AUTOREN

VINZENZ MÜLLER	FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR PRODUKTIONS-ANLAGEN UND KONSTRUKTIONSTECHNIK IPK
JANEK FASSELT	FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR PRODUKTIONS-ANLAGEN UND KONSTRUKTIONSTECHNIK IPK
CHRISTIAN KLÖTZER-FREESE	MECKLENBURGER METALLGUSS GMBH
TOBIAS KRUSE	MECKLENBURGER METALLGUSS GMBH
FLORIAN WAGNER	LASER CLADDING GERMANY GMBH

1. EINLEITUNG

Additive Manufacturing (AM) ist der Schlüssel zum Wandel der europäischen Industrie hin zu zukunftsorientierten, digital integrierten, wettbewerbsfähigen und nachhaltigen Produktionsprozessen. Obwohl AM ein großes Potenzial für den maritimen Sektor verspricht, wurde die industrielle Integration bisher durch technische, wirtschaftliche und verfahrenstechnische Hürden behindert: Ungelöste materialwissenschaftliche Fragen des nautischen Sektors, die die fertigungstechnischen Herausforderungen bei der Herstellung großvolumiger Bauteile sowie die komplexe Zertifizierung von Produkten und Prozessketten in sicherheitskritischen Anwendungen sind nur einige der vielen Punkte, die es zu lösen gilt. Das FlexiMan-Projekt befasste sich mit der Entwicklung und Verbesserung einer flexiblen additive Fertigung auf Basis des Laser-Pulver-Auftragschweißens (LPA), welches eine Untergruppe der Directed Energy Deposition-Verfahren (DED) darstellt. Diese haben unter den AM-Methoden bei weitem die größten Möglichkeiten für maritime Anwendungen. Durch die flexible Prozessführung unter lokaler Inertgasatmosphäre in Verbindung mit sehr hohen Aufbauraten können auch große Bauteile wie Propeller oder Pumpengehäuse bearbeitet werden. Ebenso sind diese Verfahren ideal für Multimaterialanwendungen wie z. B. dem Auftragen von Verschleißschichten. Ein weiterer Vorteil von DED-Verfahren ist die vielversprechende Kombination mit konventionellen Fertigungstechniken wie dem Gießen. Dieses sogenannte Hybrid Manufacturing (HM) stellt eine disruptive Erneuerung alter Denkkonzepte aus der Produktion dar und ist ein Schlüsselaspekt dieses Projekts. Das FlexiMan-Projekt zielte darauf ab, die bestehenden Fertigungsketten für drei konkrete nautische Anwendungen völlig neu zu gestalten, ihre Produktfunktionalität zu verbessern, Produktfunktionalität zu verbessern und Vorlaufzeit und Kosten um 40% zu senken. Zu diesem Zweck haben sich führende Unternehmen und Institute aus dem maritimen und AM-Sektors aus Norwegen und Deutschland zu einer starken Allianz zusammengeschlossen. Der starke Projektfokus auf Prozess- und Produktqualifizierung garantiert eine erfolgreiche industrielle Umsetzung. Dabei wurden insbesondere die maritimen Anforderungen und Rahmenbedin-

gungen berücksichtigt, werkstoff-technische Fragestellungen beantwortet und neue Ansätze für eine nachhaltigere maritime Industrie gefunden. Außerdem wurde das Recycling von Metallabfällen zu wertvollem AM-Rohstoff Pulver untersucht, um die Effizienz der maritimen Kreislaufwirtschaft zu verbessern.

Auf nationaler Ebene wurden im FlexiMan-Projekt zwei Demonstratoren aus maritimen Anwendungen betrachtet, die jeweils unterschiedliche Fragestellungen aufwarfen. Zum einen wurde die LPA-Hybrid-Fertigung eines Pumpen-Laufrads untersucht, bei dem die Pumpenflügel additiv auf konventionell gefertigte Grundkörper geschweißt wurden. Zum anderen wurde ein Prozess für die Herstellung von hohlen Flügeln eines Schiffspropellers entwickelt. Hierbei lag der Fokus neben der LPA-Prozessentwicklung auch auf dem verwendeten Material. Bei der Fertigung von Propeller fallen bei der mechanischen Bearbeitung große Mengen an Schleifspänen der verwendeten Nickel-Aluminium-Bronze CuAl10NiFe an. Im Rahmen des Vorhabens wurden Verfahrensschritte erarbeitet und evaluiert, um diese Abfälle aufzubereiten und dem LPA-Prozess zur Verfügung zu stellen. So können nachweislich die Materialkosten innerhalb des additiven Fertigungsprozesses sowie die Umwelteinwirkungen des AM-Prozesses reduzieren werden.

2. HYBRIDES PUMPEN-LAUFRAD

Die DED-Technologie ermöglicht die hybride Herstellung von Bauteilen aus mehreren Werkstoffen. Dabei werden Werkstoffe mit verbesserten Eigenschaften (z.B. die Nickel-Basis-Legierung Inconel 625) mit kostengünstigem Material (z.B. Stahl) kombiniert, um eine längere Lebensdauer des Bauteils bei geringeren Kosten zu gewährleisten. Multi-Material-Designs lassen sich mit herkömmlichen Fertigungsverfahren häufig nicht umsetzen. Gleichzeitig führt der Einsatz von beständigen Werkstoffen in beanspruchten Bauteil-Bereichen nicht nur zu einer deutlichen Erhöhung der Lebensdauer in kritischen Umgebungen, sondern auch zu Material- und Kosteneinsparungen. Diese betragen bis zu 30% im Vergleich zu Komponenten, die nur aus den teureren beständigeren Werkstoffen wie etwa Nickel-Basis gefertigt werden.

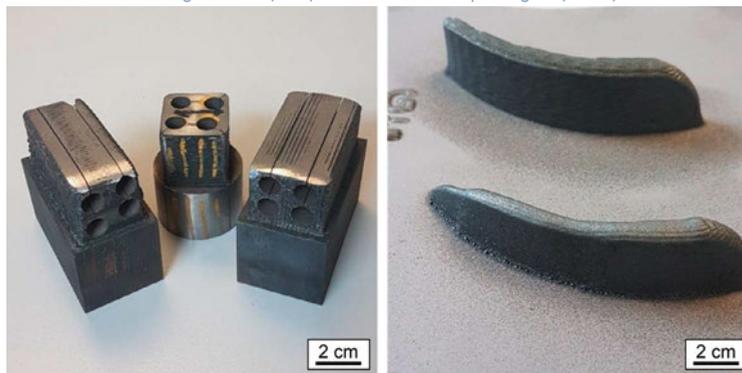
2.1 LPA-Prozessentwicklung

Die LPA-Prozessparameter bestimmen maßgeblich die Eigenschaften des zu fertigenden Bauteils und müssen daher durch Qualifizierungsprozesse geprüft und validiert werden. Neben den generellen Qualitätsanforderungen für aufgeschweißte Strukturen wie einer geringen Porosität und Anzahl von Anbindungsfehlern, hohe maximale Zugspannung oder Bruchdehnung muss in der hybriden additiven Fertigung vor allem die Übergangszone von konventionellem zu additivem Gefüge betrachtet werden. Der Grundwerkstoff sollte trotz einer schmelz-metallurgischen Anbindung nicht geschwächt werden, etwa durch die eingebrachte Wärme durch das Aufschweißen. Im Projekt wurden die LPA-Prozessparameter sowohl für einen defektfreien Aufbau der Pumpenflügel mit Inconel 625 selbst sowie für eine qualitativ hochwertige Anbindung zur S355-Grund- und Deckelplatte entwickelt.

Als Ausgangsparameter für das LPA-Verfahren wurde ein standardisierter Parametersatz gewählt, der für die Wiederaufbereitung von Stahlteilen aus Stählen der Klasse 5.2 verwendet wird. Dieser Parametersatz zielt auf eine Plattierungsdicke von 1-2 mm ab, während in diesem Projekt eine Flügelhöhe von 15-20 mm angestrebt wurde. Um eine Überhitzung des Grundmaterials zu vermeiden und das Verzugspotenzial gering zu halten, wurde die Laserleistung leicht reduziert, um den Energieeintrag pro Längeneinheit zu verringern. Außerdem wurde die Pulverzufuhrrate erhöht, was zu einem kleineren Schmelzbad führte.

Nach kleinmaßstäblichen (20 x 80 mm) 3-5-lagigen Testfeldern auf 10 mm dickem Basismaterial wurde ein Parametersatz ermittelt, der sich für die Herstellung sowohl dünner Wände als Pumpenradschaufeln als auch von Hybridblöcken von 35 x 35 x 65 mm auf Stahlgrundkörpern mit den Abmessungen 40 x 40 x 70 mm für Tests zur mechanischen Charakterisierung eignet (siehe Abb. 1). Nach der Implementierung einer Slicing-Software zur CAD/CAM-Planung wurden gekrümmte Geometrien auf flachen Stahlplatten additiv hergestellt. Zugversuche wurden an den in Abb. 1 dargestellten Hybridproben durchgeführt. Die Ergebnisse der Zugversuchsmessungen zeigen, dass die Anforderungen sowohl für die rein additiven wie für die hybriden Proben erfüllt werden konnten (siehe Tab. 1).

Abb. 1: Blöcke für Zugversuche (links) und additiven Pumpenflügeln (rechts)



Tab. 1: Ergebnisse der Zugversuche zeigen, dass die mechanischen Anforderungen an die additiven und hybriden Proben erfüllt wurden.

Kennwert	Gefordert	Longitudinal X-Richtung	Transversal (Y-Richtung)	Hybrid, IN625 auf S355 (Z-Richtung)	iO/ niO
Dehngrenze in MPa	400 (IN625)	450± 10	430± 8	–	iO
	350 (S355)	–	–	340 ±5	
Zugfestigkeit in MPa	600 (IN625)	850± 10	840± 9	–	iO
	500 (S355)	–	–	540± 4	
Bruchdehnung in %	20	35± 5	27± 5	27± 2	iO

2.2 Hybride additive Fertigung

Als hybrides Demonstrator-Bauteil wurde ein geschlossenes Pumpenlaufrad ausgewählt und entworfen. Das Bauteil hatte einen Durchmesser von 180 mm, eine finale Höhe von 66 mm und bestand aus drei Hauptteilen: Die 6 Pumpenflügel aus Inconel 625 wurden auf eine gedrehte Grundplatte (S355) aufgeschweißt, nachbearbeitet und mittels zerstörungsfreier Prüfung auf Risse und Fehlstellen geprüft. Anschließend wurde eine mit Aussparungen versehene Deckelplatte (ebenfalls S355) aufgesetzt und mit den Flügeln durch Laserschweißen verbunden. Mittels mechanischer Nacharbeit wurden Aussparungen eingefräst und Funktionsflächen nachbearbeitet.

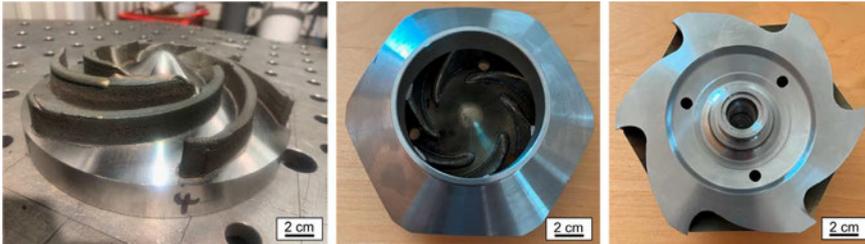


Abb. 2: Fertigungsschritte des Pumpen-Laufrads: Aufgeschweißte Flügel auf Grundplatte (links), aufgesetzte, geschweißte und nachbearbeitete Deckelplatte (Mitte) und nachbearbeitete Grundplatte (rechts)

Im Rahmen des FlexiMan-Projekts konnten die einzigartige Fähigkeit der DED-Fertigung demonstriert werden, bei der kostengünstige Materialien mit hochfesten, hochbeständigen Werkstoffen in den Bereichen mit kritischer Belastung verstärkt werden können. Diese Eigenschaften können auf andere Komponenten wie Wellen, Gehäuse, Kolben usw. ausgeweitet werden. Besonders für große Bauteile aus dem maritimen Bereich mit lokal kritischen Belastungen bietet dieser Ansatz große Vorteile. Die Instandsetzung durch ungleiche Werkstoffkombinationen zur Verbesserung lokaler Schwachstellen hat sich bereits gut bewährt. Basierend auf den in FlexiMan vorgestellten Projektergebnissen wird ein weiterer Schritt in Richtung Multimaterialkombinationen für Neuteile realisiert. Gerade im Hinblick auf die aktuellen Entwicklungen in Bezug auf Kosten und Verfügbarkeit bietet der Multimaterialansatz technisch und wirtschaftlich hoch attraktive Lösungen, die es am Markt zu präsentieren und zu etablieren gilt.

3. AUFBEREITUNG VON SCHLEIFSPÄNEN AUS DER NACHBEARBEITUNG VON SCHIFFSPROPELLERN

Bei der Nacharbeit von gegossenen Schiffspropellern, wie sie bspw. von der Mecklenburger Metallguss GmbH, Waren, hergestellt werden, fallen große Mengen an Schleifspänen aus Nickel-Aluminium-Bronze (CuAl10Fe5Ni5) an. Im FlexiMan-Projekt wurde das Ziel verfolgt, diese Materialreste durch gezielte Aufbereitungsschritte zu recyceln und daraus Zusatzwerkstoff für die additive Fertigung, im speziellen für das LPA-Verfahren zu produzieren. Neben der eigentlichen Aluminiumbronze beinhalten die Schleifspäne Verunreinigungen aus den Schleifmitteln in Form von keramischen Partikeln aus Zirkonium- und

Aluminiumoxid, Siliziumkarbid sowie Fasern und Harzrückständen von den Schleifbändern. Außerdem stellen auch die Größe und die Form der Späne eine Herausforderung für die Verwendung als Zusatzwerkstoff dar. Bei Pulvern für das LPA-Verfahren ist die Homogenität, Rundheit und Fließfähigkeit entscheidend für einen stabilen Schweißprozess und gute Materialeigenschaften. Die Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme (REM) in Abb. 3 von gesiebten Schleifspänen zeigt deutlich, wie sehr die langen und scharfkantigen Späne von sphärischen Partikeln, wie sie im AM-Bereich üblicherweise eingesetzt werden, abweichen. Im Projekt wurden daher unterschiedliche Verfahren und Methoden untersucht, um die Schleifspäne von Verunreinigungen zu trennen, ihre Partikelgrößenverteilung anzupassen und die Partikelrundheit zu erhöhen.

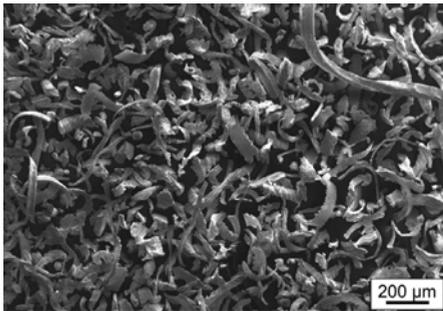


Abb. 3: Rasterelektronenaufnahme der Schleifspäne, gesiebt mittels Analysesieb (Lochdurchmesser 125 µm)

3.1 Separations- und Aufbereitungsverfahren

Im Verlauf des Verbundvorhabens wurden unterschiedliche Separationsmethoden untersucht und kombiniert. Das untersuchte Partikelgemisch wies den Vorteil auf, dass der Grundwerkstoff eine schwachmagnetische Eigenschaft aufweist. Daraus ergab sich der primäre Anwendungsfall der magnetischen Abscheidung. Weiterhin wurden der Einfluss eines statischen Elektrofeldes und die Möglichkeit der mechanischen Trennung nach Partikelgröße mittels einer Siebanlage (siehe Abb. 4) untersucht.



Abb. 4: Im Projekt durch die Mecklenburger Metallguss GmbH entwickelte mehrstufige Siebanlage zur Separation von Schleifspänen nach Partikelgröße

Als weiteres Aufbereitungsverfahren wurde Ultraschallatomisierung eingesetzt. Bei diesem Verfahren tropft aufgeschmolzenes Metall auf eine Sonotrode, die im kHz-Bereich vibriert. Durch die Vibration werden feine Partikel ausgeworfen, die in der umgebenden Schutzgasatmosphäre als runde Kugeln erstarren. Die Versuche wurden mit dem Anlagensystem AUS 500 der Fa. Amazemet, Polen und der Fa. Blue Power Castings GmbH, Walzbachtal durchgeführt. Des Weiteren wurden Schleifspäne durch Mahlen mit einer Kugelmühle der Firma LITECH GMBH, Sankt Andrä, Österreich sowie mit einer Prallstrommühle DemiNo 2250 der Fa. Aufbereitungstechnologie Noll GmbH, Bobingen aufbereitet worden.

Zur Charakterisierung der unterschiedlichen Span-Pulver wurden Pulveranalysen nach VDI 3405 Blatt 2.3 durchgeführt. Es wurden die chemische Zusammensetzung, die Partikelgrößenverteilung, die Morphologie sowie die Fließfähigkeit u.a. anhand der Klopf- und Schüttdichte ermittelt. Um die Ergebnisse besser einordnen zu können, wurde ein mittels Gasverdüsung hergestelltes AM-Referenzpulver der Legierung CuAl9.5Fe (Oerlikon Metco 51NS, Oerlikon Metco Inc. USA) als Vergleich herangezogen.

3.2 Partikelgrößenverteilung

Die Ermittlung der Partikelgrößenverteilung sowie weiterer statistischer Größen ist anhand der ISO 13322-2 mittels dynamischer Bildanalyse mithilfe des CamSizer X2 der Fa. Microtrac Retsch GmbH, Haan erfolgt. Analysiert wurden die Partikelbreite $X_{c\ min}$ und die Partikellänge $X_{Fe\ max}$. Die Partikellänge $X_{Fe\ max}$ wird dabei aus dem längsten Feret-Durchmesser und die Partikelbreite $X_{c\ min}$ aus der schmalsten Stelle des Partikels bestimmt. Die Partikelgrößenverteilung (PSD) der mittels Ultraschallatomisierung, Kugelmühle und Prallstrommühle hergestellten Pulver sowie die Partikelgrößenverteilung des Referenzpulver sind in Abb. 5 dargestellt. Das gasverdühte Referenzpulver ist durch eine schmalere PSD von $X_{c\ min} = 0,05\ mm$ bis $X_{c\ min} = 0,15\ mm$ gekennzeichnet als die recycelten Materialien. Grundsätzlich stellt aber eine breite Partikelgrößenverteilung kein Problem für die Verwendung der recycelten Materialien im LPA-Prozess dar.

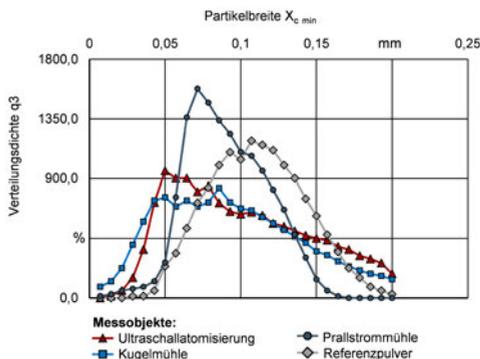


Abb. 5: Partikelgrößenverteilungen

3.3 Partikelform (Morphologie)

Die Partikelmorphologie wurde mithilfe von Aufnahmen eines Rasterelektronenmikroskops qualitativ analysiert. Ergänzend ist mithilfe der dynamischen Bildanalyse die Sphärizität ψ_s bestimmt worden, die sich durch folgende Formel berechnet

$$\psi_s = \frac{4\pi A}{P^2}$$

wobei A den Flächeninhalt, und P den Flächenumfang darstellen. Eine ideale Kugel besitzt eine Sphärizität von $\psi_s = 1$ und andere Formen, die von der runden Gestalt abweichen, haben eine Sphärizität von $\psi_s < 1$. Dieser Wert ist dabei auf das Volumen bezogen. Zusätzlich ist das Aspektverhältnis Av ermittelt worden, welches aus dem Verhältnis von Breite $X_{c\ min}$ und Länge $X_{Fe\ max}$ berechnet wird. Auch hier gilt ein Wert von Av = 1 als ideal, Werte mit Av < 1 entsprechend als weniger rund. Die Messwerte sind in Tab. 2 zusammengefasst.

Tab. 2: Sphärizität und Aspektverhältnis der Partikel unterschiedlicher Proben

Kenngroße	Gesiebte Schleifspäne	Referenzpulver	Ultraschallatomisierung	Kugelmühle	Prallstrommühle
Mittlere Sphärizität ψ_s	0,63	0,86	0,87	0,71	0,82
Aspektverhältnis Av	0,56	0,84	0,92	0,57	0,65

In Abb. 6 sind REM-Aufnahmen des Referenzpulver und der aufbereiteten Pulver zu sehen. Das Referenzpulver weist eine runde Partikelform, jedoch auch starke Anhaftungen in Form von Satellitenkörnern auf. Ebenfalls haften einzelne Partikel aneinander. Die REM-Aufnahmen zeigen weiterhin, dass sich durch das Ultraschall-Verfahren überwiegend sehr sphärische Partikel gebildet haben, was sich mit den Messungen aus der dynamischen Bildanalyse (Tab. 2) deckt. Eine Spanform auf Grund des kompletten Umschmelzens ist nicht mehr zu erkennen. Vereinzelt sind Satellitenkörner und Agglomerationen zu beobachten, die Häufigkeit aber im Vergleich zur Referenzprobe deutlich geringer. Auch die Oberfläche der Körner im Vergleich zu den übrigen Pulverproben ebener und gleichmäßiger. Im durch die Kugelmühle aufbereiteten Pulver ist die Spanstruktur hingegen weiterhin deutlich zu erkennen. Es lässt sich eine Bruchform mit einzelnen kleineren Bruchstücken aus den Bruchebenen erkennen, welche sich im etwas höheren Feinanteil im Pulver widerspiegeln. Auch die mittlere Sphärizität von $\psi_s = 0,71$ weist auf eine wenig kugelförmige Gestalt hin. Die Partikel des mittels Prallstrommühle hergestellten Pulvers zeigen hingegen eine deutliche Verrundung, was auf die Prall- und Reibkräfte, denen die Partikel in der Mühle ausgesetzt waren, zurückzuführen ist. Bruchkanten wie im Material aus der Kugelmühle sind kaum noch zu erkennen.

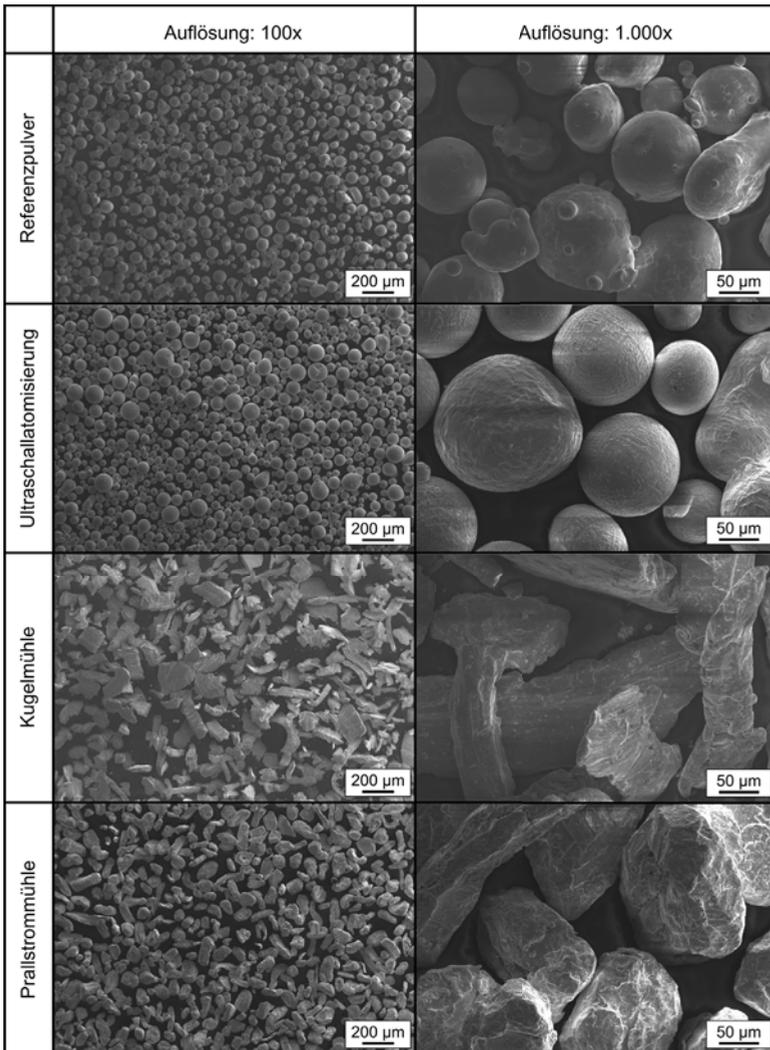


Abb. 6: REM Aufnahmen der aufbereiteten Späne und des Referenzpulvers

3.4 Fließfähigkeit

Die Fließfähigkeiten der Pulver wurden unter anderem mit dem Hausner Faktor bestimmt, welcher in Abb. 7 dargestellt ist. Dieser berechnet sich aus dem Faktor aus der Klopf- und Schüttdichte. Ein Hausner Faktor von $H=1$ bezeichnet ein ideales Pulverfließverhalten. Das mittels Ultraschallatomisierung aufbereitete Pulver weist mit $H=1,05$ eine exzellente Fließfähigkeit auf und schneidet damit besser ab als das kommerzielle Referenzpulver, das mit einem Wert von $H=1,12$ eine gute Fließfähigkeit zeigt. Die durch Kugelmühle und Prallstrommühle gewonnene Materialien sind in ihrer Fließfähigkeit mit Werten von $H=1,28$ bzw. $H=1,21$ eher mittelmäßig, konnten aber mittels LPA-Verfahren noch verarbeitet werden.

Hausner Faktor Klopf- und Schüttichte ISO 3923/3953

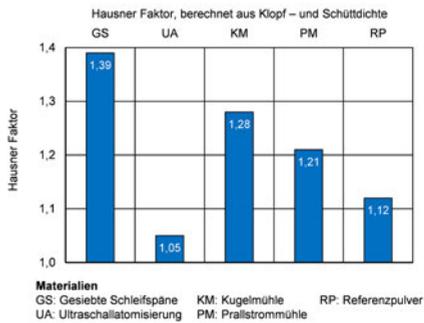


Abb. 7: Hausner Faktor, berechnet aus dem Verhältnis von Klopf- zu Schüttichte

4. ADDITIV GEFERTIGTE PROPELLERFLÜGEL

Im FlexiMan-Projekt wurde das Ziel verfolgt, skalierte Propellerblätter eines Schiffspropellers als Demonstrator mit dem LPA-Verfahren zu fertigen. Dabei mussten zwei Herausforderungen angegangen werden: Zum einen sollten Blätter aus Schleifspänen hergestellt werden, die vorher mit den in Kapitel 3 beschriebenen Aufbereitungsprozessen zu Span-Pulver verarbeitet wurden. Zum anderen wurde ein Propellerblatt mit innenliegenden Hohlräumen entworfen, das nicht mit vertretbarem Aufwand mit konventionellen Verfahren wie Guss oder Fräsen hergestellt werden können. Additive Verfahren wie LPA sind hier auf Grund des schichtweisen Aufbaus, der Flexibilität und Freiheiten im Bauteilentwurf besser geeignet.

4.1 Prozessentwicklung und Qualifizierung

Es wurden Parameterstudien für das LPA-Verfahren durchgeführt, um einen qualitativ hochwertigen und robusten additiven Aufbau zu gewährleisten. Parameter wie Laserleistung, Pulvermassenstrom und Vorschubgeschwindigkeit sowie verschiedene Aufbaustrategien wurden variiert und die Ergebnisse durch optische, metallografische und mechanische Analysen ausgewertet. Dabei wurde der Qualifizierungsprozess aus der DNV-Norm DNV-ST-B203 herangezogen, in der Prozessentwicklung und -qualifizierung für additiv und hybrid gefertigte Bauteile festgelegt sind. Die Parameter wurden für das konventionell hergestellte AM-Pulver durchgeführt und anschließend auf die recycelten Span-Pulver übertragen.

Zur Bewertung des Schweißprozesses und der Materialqualität wurden additiv aufgebaute Probekörper (siehe Abb. 8) hinsichtlich ihrer Mikrostruktur, Porosität, Mikrohärtigkeit sowie Zugfestigkeit und Bruchdehnung untersucht und mit den Anforderungen der Klasse abgeglichen. Abb. 9 zeigt die Ergebnisse der Zugversuche mit repräsentativen Spannungs-Dehnungskurven für die jeweiligen Materialien und Aufbereitungsverfahren sowie typische Kurven für Sand- und Kokillenguss als Vergleich. Wie oben bereits beschrieben, handelt es sich bei dem Referenzpulver nicht um die Legierung des Gusswerkstoffes, aus dem die Span-Pulver-Proben bestanden. Durch den hohen Eisenanteil von 5 w-% Fe in der Guss-

legierung kommt es bei hohen Abkühlraten, wie sie bei Schweißverfahren vorherrschen, zu einer Aufhärtung des Gefüges. Dies resultierte bei Proben aus recycelten Spänen in einer reduzierten Bruchdehnung, die unterhalb der materialtechnischen Mindestanforderungen liegt. Zur Reduktion der Härte wurden daher eine Wärmebehandlung durchgeführt, die eine Umwandlung des Martensit-ähnlichen Gefüges hin zum ursprünglichen Gussgefüge bewirkte.

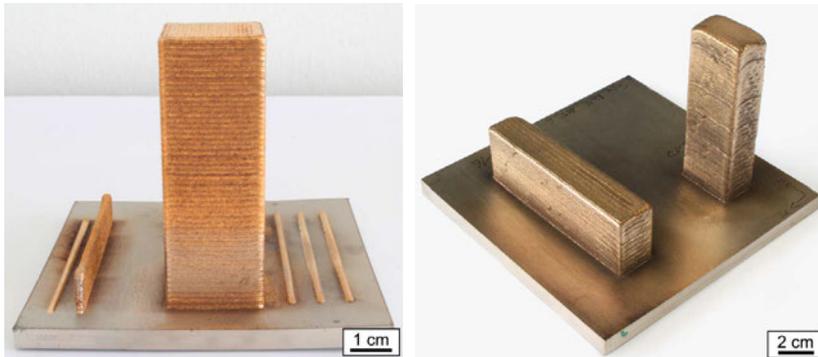


Abb. 8: Gefertigte LPA-Proben für Zugproben mit kommerziellem Referenzpulver in Aufbauichtung Z (links) und mittels Prallströhmühle aufbereitetem Pulver (rechts).

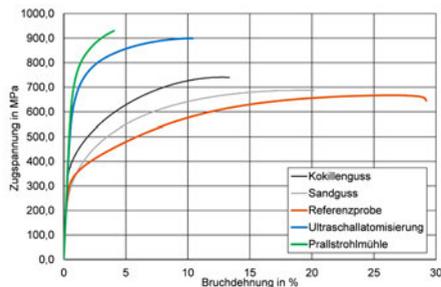


Abb. 9: Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit den Ergebnissen der Zugversuche sowie typischen Verläufen für Sand- und Kokillenguss.

4.2 Additive Fertigung der Propellerflügel

Die in der Prozessentwicklung gefundenen und untersuchten LPA-Parameter wurden verwendet, um unterschiedliche Propellerflügel aus Referenzmaterial (CuAl9.5Fe) sowie durch Ultraschallatomisierung und Prallströhmühle aufbereiteten Pulvern additiv zu fertigen. Die Herausforderungen lagen dabei in der Optimierung der Aufbaustrategie und der Programmierung der Werkzeugwege in einer entsprechenden CAD/CAM-Umgebung. Die Flügel wurden additiv in radialen Schichten im 5-Achs-Betrieb auf einer Trumpf TruLaser Cell 7020 am Fraunhofer Institut für Produktionstechnik IPK, Berlin aufgebaut (Abb. 10). Anschließend wurden die Oberflächen der Bauteile durch die Mecklenburger Metallguss GmbH, Waren nachbearbeitet und mittels Farbeindringprüfung auf Risse und Ultraschallmessung auf Wanddicken (siehe Abb. 11) geprüft.

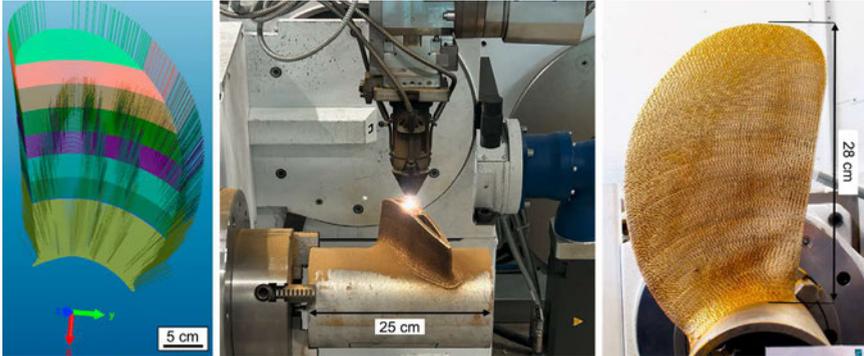


Abb. 10: LPA-Prozess zum Aufbau des hohlen Demonstrator-Flügels: Radiale Schichtengruppen in CAD/CAM-Umgebung (links), LPA-Prozess während des Aufsweißens mit Prozesskopf und sichtbaren Hohlräumen in der Blattmitte (mitte) und fertiges Blatt (rechts).



Abb. 11: Ultraschallprüfung des geschliffenen LPA-Propellerblattes

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen des Verbundprojektes auf nationaler sowie europäischer Ebene konnte erhebliches Wissen im Bereich additiver Fertigung mit LPA sowie die Verwendung unterschiedlicher Materialien im maritimen Bereich generiert werden. Die Kombinationen mehrerer Materialien in einem Bauteil oder die Aufbereitung von Abfallprodukten als Ausgangsstoff (AM-Pulver) für die additive Fertigung kann für zukünftige Anwendungen im maritimen Bereich ein großes Potential darstellen. Die im Projektverlauf erreichten Ergebnisse stellen für die einzelnen Projektpartner die Basis für weiterführende Entwicklungsaktivitäten dar.

LITERATUR

- [1] Müller, V., Marko, A., Kruse, T., Biegler, M., Rethmeier, M., 2022. Analyse und Nutzung von Aluminium-Bronze-Schleifstaub für das Laser-Pulver-Auftrags-schweißen. 42. Assistentenseminar Füge- und Schweißtechnik 2021.
- [2] Müller, V., Marko, A., Kruse, T., Biegler, M., Rethmeier, M., 2021. Analysis and recycling of bronze grinding waste to produce maritime components using directed energy deposition. LiM - Lasers in Manufacturing 2021.
- [3] Müller, V., Fasselt, J.M., Kruse, T., Klötzer-Freese, C., Kleba-Ehrhardt, R., Choma, T., Biegler, M., Rethmeier, M., 2023. Using ultrasonic atomization to recycle aluminium bronze chips for additive laser directed energy deposition. Nordic Laser Material Processing Conference.

MARTERA-AUTOPLAN

NUMERISCHE UND EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN EINES SCHNELLEN EINRUMPF-BOOTS

AUTOREN

BARBARA BLUM-THOMAS	TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN
PROF. DR.-ING.	TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN
ANDRÉS CURA HOCHBAUM	
KAY DOMKE	SCHIFFBAU-VERSUCHSANSTALT POTSDAM GMBH
DR.-ING. STEFAN HARRIES	FRIENDSHIP SYSTEMS AG
EMILIE SCHMIDT	SCHIFFBAU-VERSUCHSANSTALT POTSDAM GMBH
DR.-ING. SEBASTIAN UHAREK	FRIENDSHIP SYSTEMS AG
MATTHIAS VOLKMANN	TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

1. EINLEITUNG

Das Ziel des europäischen Verbundvorhabens AutoPlan im Rahmen des MarTERA Programms ist die hydrodynamische Untersuchung und anschließende Optimierung eines Gleitbootes. Die Untersuchung erfolgte sowohl mit Hilfe numerischer Verfahren als auch durch Versuche im Modell- und Großausführungsmaßstab. Während der hydrodynamischen Untersuchungen wurde ein starker Fokus auf das Manövrierverhalten des Schiffes gelegt und an der TU Berlin ein mathematisches Modell zur Manövrierprognose entwickelt. Unter Zuhilfenahme dieses mathematischen Modells wurde vom türkischen Projektpartner OES ein Intelligent Navigation Assistance System (INA) entwickelt, welches die Schiffsführung bei der Vermeidung potenziell kritischer Situationen unterstützt.

Im Rahmen des Projektes wurde ein vollparametrisches Geometriemodell in CAESSES® von FRIENDSHIP SYSTEMS entwickelt, welches auf einem initialen Design der türkischen Schiffswerft UZMAR basierte. Anschließend wurden hieraus drei Designs abgeleitet, welche sowohl numerisch als auch experimentell umfassend vom FG Dynamik Maritimer Systeme der TU Berlin untersucht wurden.

Für die Optimierung des Leistungsbedarfs wurden durch FRIENDSHIP SYSTEMS zahlreiche numerische Simulationen in einem vollautomatisierten Setup durchgeführt, welche mit Hilfe der experimentellen Daten der TU Berlin validiert wurden.

Zusätzlich zu der Entwicklung des mathematischen Modells zur Manövrierprognose werden an der TU Berlin Untersuchungen zum besseren Verständnis möglicher Instabilitäten, wie beispielsweise Porpoising, durchgeführt.

Zum Ende des Projektes wurden von der SVA Potsdam Großausführungsmessungen auf dem von UZMAR gebauten Full-Scale Prototypen durchgeführt, welcher mit dem INA-System ausgerüstet wurde. Die Ergebnisse der Versuche dienen sowohl der Validierung der Modellversuche und numerischen Verfahren als auch einer Funktionserprobung des INA-Systems.

2. VOLLPARAMETRISCHES GEOMETRIEMODELL

Der verwendete vollparametrische Modellierungsansatz folgt einem Ansatz von Harries (1998). Hierfür werden zunächst zwei- und dreidimensionale Basiskurven, wie beispielsweise die Deckskontur, die Kiellinie, die Stevenkontur oder die Berandungskurven der Sprayrails modelliert. Die Beschreibung dieser Kurven erfolgt durch Parameter. Eine Teilmenge des Parametersatzes kann als sog. Design Variablen im Verlauf einer Optimierung verändert werden, um die Zielfunktion zu minimieren. Für die Sprayrails beispielsweise lässt sich deren Breite sowie der Abstand der inneren Kante der Spritzleiste von der Mittschiffsebene am Heckspiegel vorgeben. Abb. 1 zeigt alle verwendeten Basiskurven.

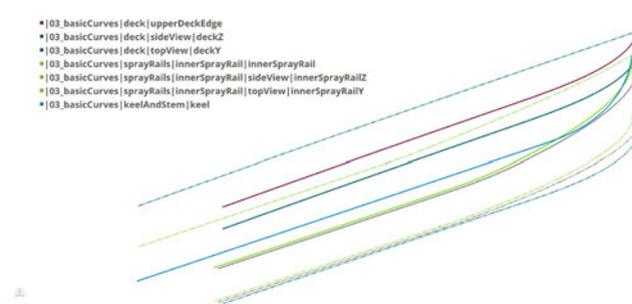


Abb. 1: Dreidimensionale Basiskurven des vollparametrischen Modells

Anschließend werden mittels der Basiskurven die Flächen aufgebaut. Manche Flächen, wie beispielsweise die Sprayrailfläche, sind einfache Regelflächen zwischen den beiden Berandungskurven (ruled surface), während die Bodenfläche als MetaSurface zwischen der Kiellinie und der Sprayrail modelliert wurde. MetaSurfaces sind CAESES®-spezifische, parametrische Sweep-Surfaces. Abb. 2 zeigt die resultierenden Flächen des Modells.

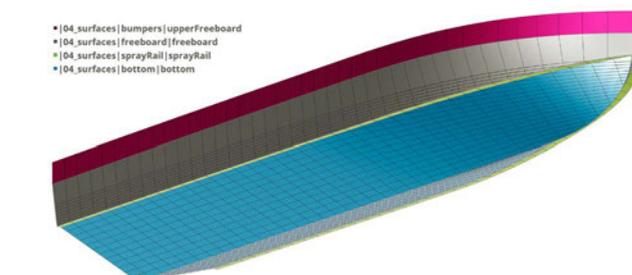


Abb. 2: Resultierende Flächen des vollparametrischen Modells

Anschließend wurde ein vollparametrisches Modell für den Propellertunnel entwickelt, welcher anschließend über eine boolesche Operation in das Bare-Hull Volumenmodell integriert wurde. Insgesamt stehen somit für die Optimierung acht Design Variablen zur Modifizierung der Bare-Hull Geometrie und 10 Design Variablen zur Modifizierung des Tunnels zur Verfügung. Abb. 3 zeigt exemplarisch fünf generierte Varianten.

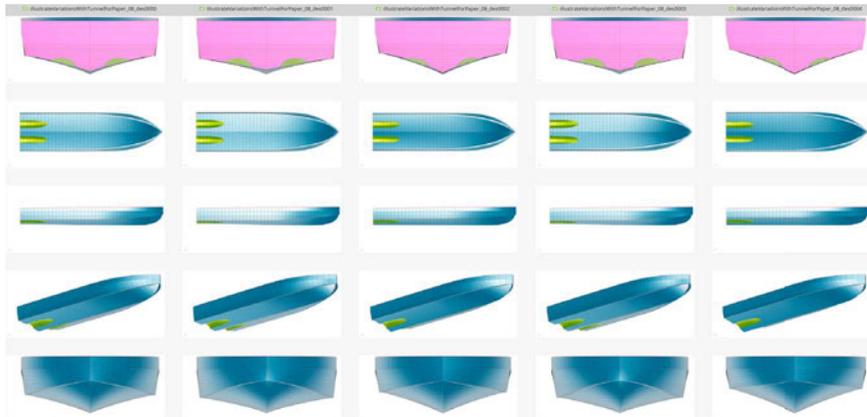


Abb. 3: Designvariationen für die finale Geometrie mit Tunnel

3. NUMERISCHE OPTIMIERUNG

Für die Optimierung ist es erforderlich die Zielfunktion – in diesem Fall den Propellerschub – für jedes Design auszuwerten. Im vorliegenden Fall wurden hierfür RANS-Berechnungen unter Berücksichtigung der freien Oberfläche und dynamischer Schwimmlagenanpassung mit dem kommerziellen CFD-Code Simcenter STAR-CCM+ durchgeführt. Da die dynamische Schwimmlage eines Gleitbootes von der Propulsion stark beeinflusst wird, wurde der Effekt des Propellers durch ein Volumenkraftmodell nachgebildet. Auch wenn es technisch kein Problem darstellen würde, die tatsächliche Propellergeometrie in der Optimierung zu berücksichtigen, wäre der Berechnungsaufwand um ein Vielfaches höher. Alle CFD-Berechnungen wurden im Modellmaßstab durchgeführt. Für Details siehe Ahmed (2022).

Vor Beginn der Optimierungskampagne wurden zahlreiche Untersuchungen hinsichtlich der Konvergenz, des Einflusses der Gitterauflösung auf die Optimierung und die Validierung mit Hilfe der experimentellen Daten der TU Berlin durchgeführt. Details finden sich in Harries et al. (2023). Abb. 4 zeigt exemplarisch die Validierung der Längskraft für verschiedene Voraugeschwindigkeiten.

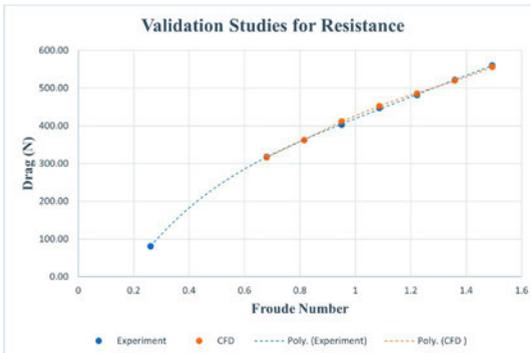


Abb. 4: Validierung der StarCCM+ Simulationen

Damit die Optimierung durchgeführt werden kann, muss die Auswertung der Zielfunktion vollautomatisch erfolgen. Hierfür wurde STAR-CCM+ mit Hilfe eines Software-Connectors an CAESES angebunden. Nach dem Export der neuen Geometrie wird dann in STAR-CCM+ automatisch ein neues Gitter generiert und die CFD-Rechnung durchgeführt. Anschließend werden integrale Daten wie der Schub, Trimm, Sinkage etc. zusammen mit Snapshots des Strömungsfeldes an CAESES zurückübertragen. Diese Daten werden zum einen zur Visualisierung genutzt, zum anderen dienen sie als Input für die Design-Engine, d.h. die Strategie, welche die Optimierung steuert. Abb. 5 zeigt die Ergebnisse von drei vollautomatisch erzeugten Designs in CAESES.

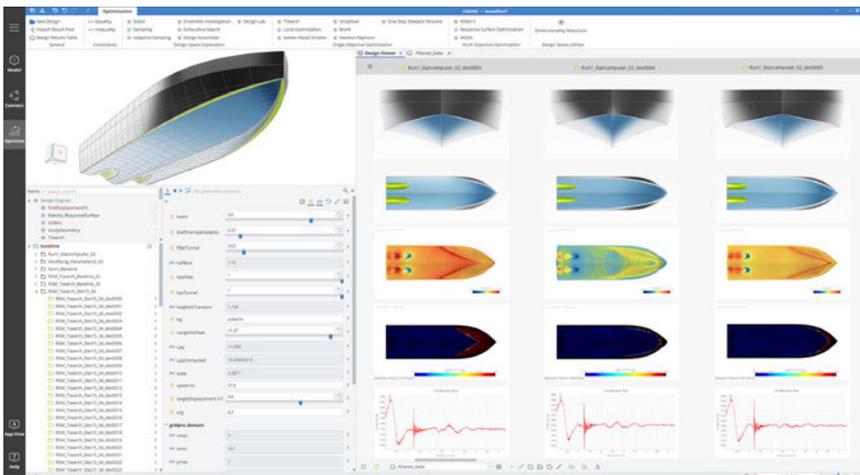


Abb. 5: Postprocessing der Optimierungsergebnisse in CAESES

Nachdem ein validiertes numerisches Setup zur Verfügung stand, wurde zur Exploration des 18-dimensionalen Entwurfsraums zunächst ein Design-of-Experiment durchgeführt. Die Werte für die Design Variablen wurden mit einer quasi-zufälligen Sobol-Seqenz generiert. Die Ergebnisse sind in Abb. 6 dargestellt. In der ersten Spalte sind die Ergeb-

nisparameter wie Schub, Widerstand, Trimm, Tauchung, etc. über die Designs dargestellt. In den nachfolgenden Spalten werden die Ergebnisparameter über die verwendeten Design Variablen aufgeführt. Für jeden Plot wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt; die Farbe der einzelnen Diagramme korreliert dabei mit dem Ergebnis dieser Analyse. Blaue Bereiche bedeuten eine starke, negative Korrelation und rot eine starke, positive Korrelation.

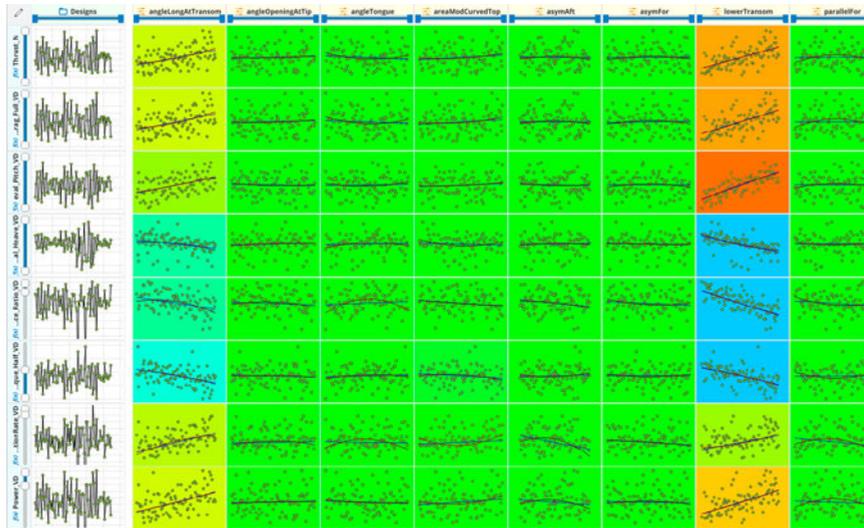


Abb. 6: Analyse der Korrelation zwischen Designvariablen und Ergebnisparametern

Ein Design-of-Experiment erlaubt es dem Nutzer wichtige Design Variablen schnell zu identifizieren und über die Verteilung der Werte der Zielfunktion im Entwurfsraum einen guten ersten Eindruck des Optimierungspotentials zu erhalten. Darüber hinaus können die erzeugten und berechneten Varianten als Eingabedaten für ein numerisches Ersatzmodell (Surrogate) dienen, welches anschließend für eine formelle Optimierung der Zielfunktion verwendet werden kann.

Ein Surrogate-Modell ist eine mathematische Modellierung der Zielfunktion in Abhängigkeit der Design Variablen mit Hilfe eines Trainingsdatensatzes und erlaubt anschließend die Berechnung von weiteren Varianten innerhalb des Entwurfsraums in vernachlässigbar kleiner Rechenzeit und eignet sich daher sehr gut für Optimierungen.

In diesem Fall wurden zahlreiche Optimierungen mit verschiedenen Algorithmen durchgeführt. Zunächst kam der T-Search, ein klassisches Tangentensuchverfahren zum Einsatz, anschließend wurde das gleiche Verfahren auf einem Surrogate-Modell angewendet. Die Ergebnisse sind in Abb. 7 dargestellt.

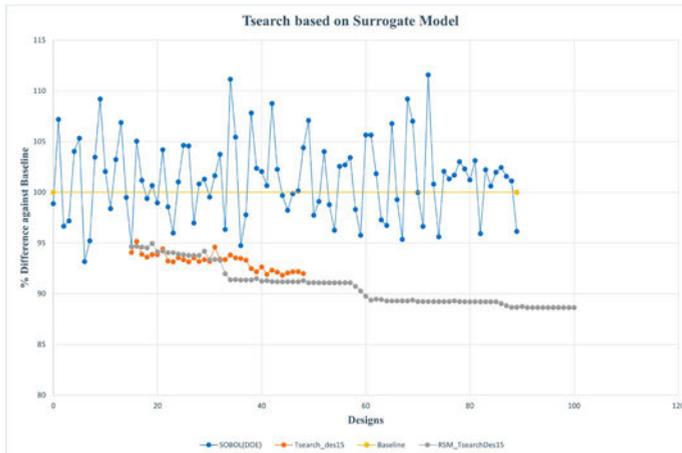


Abb. 7: Ergebnis der Optimierung: Reduktion des benötigten Schubes gegenüber der Baseline

Es ist zu erkennen, dass die quasi-zufällige Sobolsequenz im Mittel Designs erzeugt, welche schlechter sind als die Baseline. Dies ist zu erwarten, wenn man mit einem relativ guten Design startet. Ausgehend von einem guten Design aus dem Sobol-Run wurde eine Optimierung gestartet. Es ist deutlich zu erkennen, dass der T-Search eine Reduktion des benötigten Schubes zeigt, jedoch relativ viele Evaluationen der Zielfunktion und damit auch Rechenzeit benötigt. Die Optimierung auf dem Surrogate-Modell hingegen benötigt keine nennenswerten Rechenzeiten und erlaubt durch die dadurch höhere Zahl der untersuchbaren Varianten eine zusätzliche Verbesserung. Zur Validierung des Surrogate-Modells wurde die resultierende optimierte Variante nochmals mit Star-CCM+ berechnet.

4. MATHEMATISCHES MANÖVRIERMODELL

Eine bewährte Methode zur Vorhersage der Manövrierbarkeit von Verdrängerschiffen basiert auf der Zeitintegration der Bewegungsgleichungen in drei oder vier Freiheitsgraden (FHG). Dabei werden die hydrodynamischen Kräfte und Momente durch ein systembasiertes mathematisches Modell, welches aus einem polynomischen Ansatz dritter Ordnung für jede Kraftkomponente besteht, berechnet. Die dafür benötigten hydrodynamischen Koeffizienten können bspw. durch virtuelle gefesselte Versuche gewonnen werden, wie z.B. in Cura Hochbaum (2006) und Cura Hochbaum und Uharek (2014) erfolgreich gezeigt wurde. Da bei Gleitbooten während eines Manövers jedoch größere Änderungen in der dynamisch entstehenden Schwimmlage auftreten, müssen für eine gute Vorhersage alle sechs FHG berücksichtigt werden.

Zusammen mit dem Ruderwinkel gibt es also sieben Parameter sowie ggf. deren Ableitungen, die das Manövrierverhalten beschreiben. Werden für ein Modell dritter Ordnung alle Parameter mit allen kombiniert, bekommt man schnell eine sehr große Anzahl an hydrodynamischen Koeffizienten, die alle durch gefesselte Versuche bestimmt werden müssen. Das führt zu einem unverhältnismäßig großen Rechenaufwand. Sinnvoller ist

daher, die Anzahl im Vorhinein zu reduzieren, indem man jene Parameter und insbesondere Kombinationen von Parametern eliminiert, die nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Manöver haben.

Im Zuge des AutoPlan-Projekts wurde daher in Anlehnung an Vorarbeiten von Katayama et al. (2006) und Yasukawa et al. (2016) ein neues sogenanntes 3+3 DOF Manövriermodell entwickelt, s. Cura Hochbaum et al. (2022). Hier werden die drei Gleichungen, welche das Manövrieren des Schiffes in der horizontalen Ebene beschreiben und die drei schwimmlagenbeschreibenden Gleichungen für die Erhebung ζ_0 , die Krängung φ und den Trimm θ getrennt behandelt.

Hierbei werden in jedem neuen Zeitschritt der Manöversimulation, zunächst unter Annahme bekannter Schwimmlage, die drei Bewegungsgleichungen für das Manövrieren des Schiffes in der horizontalen Ebene zeitlich integriert. Im Anschluss wird durch Integration der weiteren drei Bewegungsgleichungen die Schwimmlage aktualisiert.

Während der Lösung der Manövriergleichungen wird die Schwimmlage als quasistationär und dadurch als aus dem letzten Zeitschritt bekannt betrachtet. Dadurch sind hydrodynamische Koeffizienten zum Erfassen der Abhängigkeit der horizontalen Kräfte und des Giermomentes von den schwimmlagenbeschreibenden Parametern nicht erforderlich. Stattdessen werden jedoch alle übrigen Koeffizienten für verschiedene vorgegebene Schwimmlagen bestimmt, sodass während der Manöversimulation durch Interpolation zwischen diesen ein maßgeschneiderter Satz an hydrodynamischen Koeffizienten für die aktuelle Schwimmlage herangezogen werden kann. Umgekehrt wird bei der Lösung der Schwimmlagegleichungen der aktuelle Manövierzustand als bekannt angenommen.

Weitere Vereinfachungen werden getroffen, indem vor allem Dreifach-Korrelationen der übrigen Parameter vernachlässigt werden sowie zeitliche Ableitungen des Ruderwinkelparameters, da beide nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Manöver aufweisen. Anders als üblicherweise bei Zweischraubern der Fall, kann hier beim mathematischen Modell die Symmetrie des Schiffes an der Mittellängsebene nicht ausgenutzt werden, da das Unterwasserschiff – und mit ihm die hydrodynamischen Kräfte – in gekrängter Lage asymmetrisch wird. Ein Beispiel einer Kraftmodellierung wird in der folgenden Gleichung für die Querkraft gezeigt:

$$\begin{aligned}
 Y = & Y_0 + Y_{\dot{u}} \dot{u} + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_{\delta} \delta + Y_{\delta\delta} \delta^2 + Y_{\delta\delta\delta} \delta^3 + Y_u \Delta u + Y_{uu} \Delta u^2 + Y_{uuu} \Delta u^3 + Y_v v + Y_{vv} v^2 + Y_{vvv} v^3 \\
 & + Y_r r + Y_{rr} r^2 + Y_{rrr} r^3 + Y_{vr} v r + Y_{vrr} v r^2 + Y_{vvr} v^2 r + Y_{uv} \Delta u v + Y_{uvv} \Delta u v^2 + Y_{uuv} \Delta u^2 v \\
 & + Y_{ur} \Delta u r + Y_{urr} \Delta u r^2 + Y_{uur} \Delta u^2 r + Y_{u\delta} \Delta u \delta + Y_{u\delta\delta} \Delta u \delta^2 + Y_{uu\delta} \Delta u^2 \delta + Y_{v\delta} v \delta + Y_{v\delta\delta} v^2 \delta \\
 & + Y_{v\delta\delta} v \delta^2 + Y_{r\delta} r \delta + Y_{rr\delta} r^2 \delta + Y_{r\delta\delta} r \delta^2
 \end{aligned}$$

Jeder Koeffizient ist hierbei selbst eine Funktion der drei Schwimmlagenparameter ζ_0, φ, θ , also bspw. $Y_v = Y_v(\zeta_0, \varphi, \theta)$.

Um all diese Koeffizienten zu bestimmen, wurden mit dem RANS-Code Neptune virtuelle gefesselte Modellversuche durchgeführt. Jeder Versuch wird dabei für $3\zeta_0,5\varphi,3\theta=45$ Schwimmlagen wiederholt. Durch eine Beschränkung der Simulationsmatrix auf relevante Manövriertzustände, kann die Anzahl an Einzelsimulationen auf ca. 1600 eingegrenzt werden. Alle gefesselten Versuche finden unter Einbeziehung der Propulsion statt. Die Wirkung des Propellers wird dabei durch ein weiterentwickeltes Volumenkraftmodell, welches den Propellereffekt sehr präzise erfasst, eingebracht. Dafür sind zahlreiche aufwendige RANS-Simulationen für den isolierten Propeller in homogener Parallel- und Schräganströmung nötig. Die Ergebnisse werden jedoch im Vorfeld in eine Datenbank gespeichert, sodass bei der Berechnung der hydrodynamischen Koeffizienten lediglich ein vernachlässigbarer Mehraufwand an Rechenzeit entsteht. In Abb. 5 sind auf der linken Seite Details des numerischen Gitters an den Anhängen des Schiffes dargestellt und auf der rechten Seite das sich ausprägende Wellenbild am Schiff in der simulierten Geradeausfahrt.

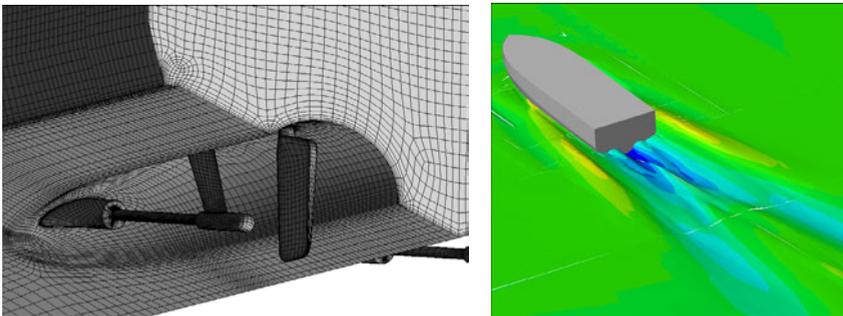


Abb. 5: Details des Berechnungsgitters am Heck und das Schiffswellensystem in der Simulation

Die Adaption des Codes für diesen Anwendungsfall und die erarbeitete numerische Strategie erlauben eine effiziente Durchführung der gesamten Matrix auf dem Rechencluster des Fachgebiets in weniger als drei Wochen. Nach dieser Vorbereitungszeit kann jedes gewünschte Rudermanöver für einen beliebigen Beladungszustand und eine frei gewählte Ausgangsgeschwindigkeit in einem Sekundenbruchteil simuliert werden. Diese Schnelligkeit erlaubt den Einsatz der Vorhersagemethode in Navigationsassistenzsystemen, wie dem von den türkischen Projektpartnern OES entwickelten INA-System. Hier kann es für die Entscheidungsfindung bei Ausweichmanövern als Grundlage herangezogen werden.

5. VALIDIERUNG IM MODELLMASSTAB

Zur Validierung der CFD-Simulationen wurden sowohl mit dem Basic-Design, als auch mit dem von FRIENDSHIP SYSTEMS optimierten Design Modellversuche durchgeführt. Die Versuche fanden nach Froudescher Ähnlichkeit statt, was bei einer Dienstgeschwindigkeit der Großausführung von 27,5kn zu einer Modellgeschwindigkeit von 7,8m/s führte. Alle Modellversuche fanden an der TU Berlin in der großen Schlepprinne (250m lang, 4,7m tief, 8m breit, max. 12m/s) statt. Im Rahmen des Projekts wurde eigens für die Modellversuche eine neue Messplattform und eine neue Versuchstechnik entwickelt und

erfolgreich umgesetzt. Diese ermöglicht Versuche mit freiem Trimmen und Tauchen, sowie gefesselte Versuche und die präzise Messung sämtlicher Kräfte, Momente, Translationen und Rotationen (siehe Abb. 9). Die benötigten Modelle wurden als Projektbeitrag der SVA Potsdam im Maßstab 3,29 gefertigt. Es wurden Propulsions-, Schrägglepp-, Ruderwinkel-, und Krängungsversuche, sowie kombinierte Versuche, sowohl mit freiem Trimm und Tauchen als auch mit komplett gefesselter vorgegebener Schwimmlage, durchgeführt. Es zeigte sich eine zufriedenstellende bis gute Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen. Beispielhaft ist in Abb. 10 der Vergleich der Querkraft und des Giermoments in einer festen Schwimmlage bei verschiedenen Driftwinkeln dargestellt.



Abb. 9: Gefesseltes Modell in vorgegebener Schwimmlage an der neu entwickelten Messplattform

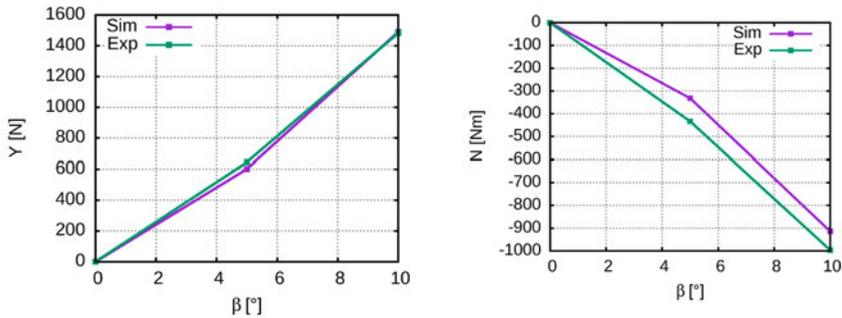


Abb. 10: Vergleich von Querkraft (links) und Giermoment (rechts) im Schräggleppversuch aus Modellversuch und Simulation

6. VALIDIERUNG IN DER GROSSAUSFÜHRUNG

Im Rahmen von Großausführungsmessungen beim türkischen Partner UZMAR in Kocaeli wurden verschiedene Manöver gefahren, um die oben beschriebene Simulationemethode sowie die Modellversuchstechnik zu validieren. Im Rahmen der Messkampagne wurden an dem schnellen Monohull bei einem Beladungszustand von 11,4t die in Tabelle 1 dokumentierten Größen gemessen.

Tabelle 1: An der Großausführung gemessene physikalische Größen und das dafür verwendete Messsystem.

Messgröße	Messgerät/-system
Position (x, y, z)	SatMotion basierend auf 3 GNSS Antennen, Gyroskop
Beschleunigungen (x, y, z)	SatMotion basierend auf 3 GNSS Antennen, Gyroskop
Winkel (Roll, Pitch, Kurs)	SatMotion basierend auf 3 GNSS Antennen, Gyroskop
Winkelbeschleunigungen (Roll, Pitch, Kurs)	SatMotion basierend auf 3 GNSS Antennen, Gyroskop
Geschwindigkeit	SatMotion basierend auf 3 GNSS Antennen, GPS
Schub	Eigenentwicklung basierend auf DMS
Drehmoment	Eigenentwicklung basierend auf DMS
Drehzahl	Berührungsloses optisches Messsystem
Ruderwinkel	Digitaler Absolutwinkelgeber
Drücke an 8 Positionen entlang des Rumpfes	Absolutdrucksensoren

Es sind neben Geradeausfahrten vor allem Drehkreismanöver mit verschiedenen Ruderwinkeln, sowie Z-Manöver mit verschiedenen Ruderwinkeln und Kursabweichungen untersucht worden. Eine erste Analyse einer Geradeausfahrt und eines Drehkreismanövers wird nachfolgend diskutiert.

Als erste Untersuchung wurde in einer Geradeausfahrt die Geschwindigkeit schrittweise erhöht, um die auf Basis von Modellversuchen prognostizierten Werten von Schub und Drehmoment mit den Werten der Großausführung zu vergleichen. In Abb. 11 sind entsprechend Schub, Drehmoment und Drehzahl der Messungen dargestellt. Hierbei ist eine sehr gute Übereinstimmung zu erkennen, lediglich die Schubwerte der Großausführung liegen leicht über der Prognose. Die Abweichungen zur Prognose können z. B. durch eine leicht veränderte Schwimmlage im Vergleich zu den Modellversuchen, aber auch die Umgebungsbedingungen wie Wind und Strömung erklärt werden.

Zur Validierung des Einsatzes eines in früheren Projekten entwickelten GNSS-Messsystems (SatMotion) für schnelle Schiffe wurden die Bewegungsparameter (Trimmwinkel, Rollwinkel, Kurswinkel, Längs- und Querbewegung), Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten sowohl mit dem Antennensystem als auch mit einer herkömmlichen Inertial Measurement Unit (IMU) bzw. einem Gyroskop und einem GPS-Empfänger gemessen. Es zeigte sich eine gute Übereinstimmung beider Messungen. Beispielhaft dafür ist in Abb. 12 ein Vergleich der von der SVA gemessenen Winkelbeschleunigungen mit den von der TUB aus den Bewegungsmessungen berechneten Winkelbeschleunigungen für ein ZZ20/20-Manöver dargestellt. Zudem zeigt die Abbildung einen Vergleich der von beiden Systemen ermittelten Rollwinkel. Auch hierbei ist eine sehr gute Übereinstimmung zu erkennen.

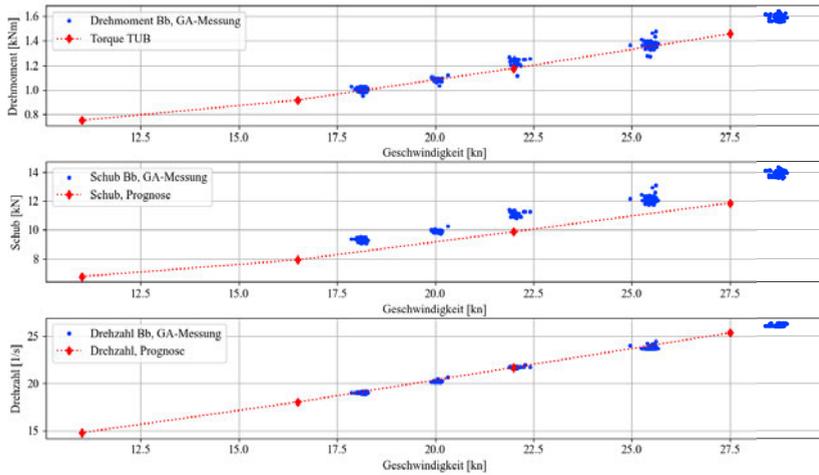


Abb. 11: Vergleich von Modellprognosewerten mit der Großausführungsmessung. Oben: Drehmoment. Mitte: Schub. Unten: Drehzahl.

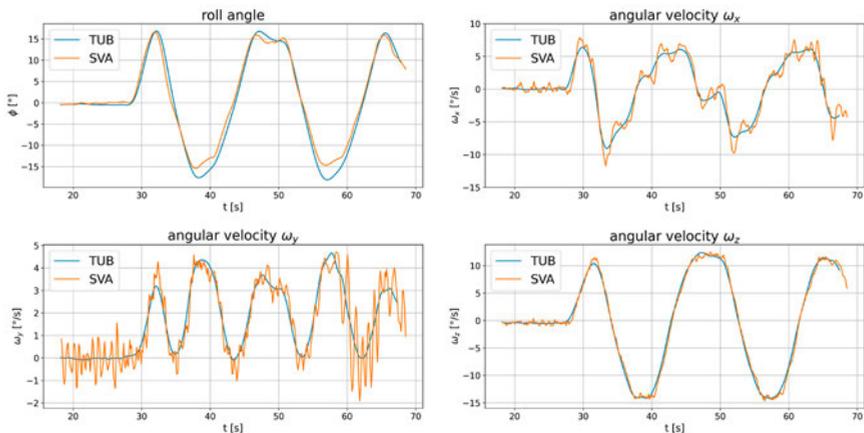


Abb. 12: Vergleich der gemessenen/ermittelten Winkelgeschwindigkeiten und Rollwinkel von TUB (blau) und SVA (orange) für ein ZZ20/20 Manöver

Für ein Drehkreismanöver nach Backbord mit 10° Ruderwinkel und 29 kn Anfangsgeschwindigkeit sind die Druckmessungen am Rumpf des Bootes in Abb. 13 dargestellt. Die Geschwindigkeit fällt dabei innerhalb des Drehkreises auf ca. 26.5 kn ab. Die genauen Positionen der Druckmessstellen sind in Tabelle 2 dokumentiert. Der Beginn des Manövers bei ca. 21 s, sowie das Ende des Manövers bei 105 s, ist deutlich auch in den Druckmesssignalen zu sehen. Weiter zeigen die Messsignale, dass keiner der Sensoren während des Manövers ausgetaucht ist, da ein Abriss oder eine sprunghafte Änderung des Messsignals nicht zu erkennen ist. Ein direkter Vergleich zu den Simulationen und damit auch die Interpretation der gezeigten stark unterschiedlichen Drücke, vor allem der beiden vorderen Sensoren, stehen noch aus.

Tabelle 2: Positionen der am Rumpf verbauten Drucksensoren.

Sensornummer (Steuerbord)	Sensornummer (Backbord)	x-Position [mm] vom Heck	y-Position [mm] von Mittschiff
1	5	7330	+/- 329
2	6	7593	+/- 329
3	7	7856	+/- 329
4	8	8119	+/- 329

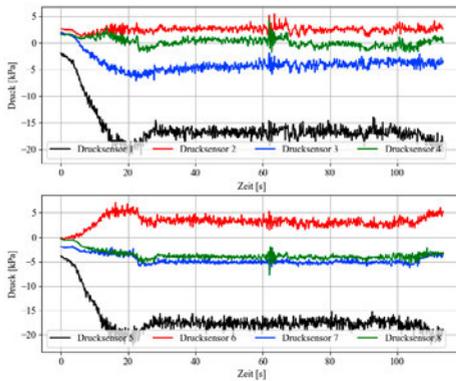


Abb. 13: Druckverläufe der nahe am Bug montierten Drucksensoren. Jeweils 4 an Steuer- und Backbord.

Zur Validierung der oben beschriebenen Manövriersimulationsmethode sollen die in den Messungen gefahrenen Manöver mit denselben Parametern simuliert und alle verfügbaren Bewegungsparameter verglichen werden. Derzeit laufen die finale Simulationskampagnen zur Bestimmung aller hydrodynamischen Koeffizienten und die Auswertung der zweiten Großausführungsmessungen.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im MarTERA-Verbundprojekt AutoPlan wurde basierend auf einer vom Konsortialführer UZMAR zur Verfügung gestellten Baseline-Geometrie ein vollparametrisches Modell für einen gleitenden Monohull entwickelt. Anschließend wurde ein CFD-Setup mit StarCCM+ aufgesetzt, welches für eine Optimierung des benötigten Schubes verwendet wurde. Die Optimierung wurde mit Hilfe von CAESSES durch FRIENDSHIP SYSTEMS geleistet. Die Ergebnisse wurden durch Modellversuche an der TU Berlin validiert. Es konnte gezeigt

werden, dass der Prozess des simulation-driven Designs auch für so komplexe Anwendungsfälle wie ein Gleitboot mit heutigen Ressourcen realisierbar ist und zu einer deutlichen Reduzierung der benötigten Leistung beiträgt.

Darüber hinaus wurde eine neue vollständig numerische Simulationsprognosemethode für Gleitboote bzw. Schiffe mit großer dynamischer Schwimmlagenänderung entwickelt, welche sich durch eine hohe Präzision bei gleichzeitig sehr geringer Rechenzeit auszeichnet. Diese Eigenschaften ermöglichen eine Verwendung der Methode in einem Navigationsassistenzsystem, welches von dem türkischen Projektpartner OES entwickelt wurde und auf dem von UZMAR gebauten Prototypen eingesetzt wird. Des Weiteren stellt diese Entwicklung einen wichtigen Fortschritt dar, was die zuverlässige Vorhersage des Manövrierverhaltens schneller Wasserfahrzeuge betrifft.

Beide neuen Verfahren wurden mithilfe von umfangreichen Modellversuchskampagnen, welche im Schlepptank der TUB durchgeführt wurden, erfolgreich validiert. Hier kam eigens zu diesem Zweck entwickelte Versuchstechnik zum Einsatz. Dank der türkischen Projektpartner konnten außerdem ausführliche Großausführungsmessungen durch SVA und TU Berlin an Bord des Prototyps stattfinden, welche derzeit ausgewertet werden, um dann eine direkte Validierung der Manövrierprognose zu ermöglichen.

Die entwickelten Methoden sind sehr effizient und die ersten Validierungsergebnisse versprechen eine hohe Genauigkeit. Durch die erfolgreiche Zusammenarbeit aller Partner konnte mit diesem Projekt ein erster Schritt in Richtung autonom fahrender schneller Monohulls unternommen werden. Zukünftig kann eine Generalisierung für verschiedene Gleitumpfdesigns angestrebt werden, sodass die Optimierung und Manövrierprognose für ein beliebiges neues Gleitboot automatisiert durchgeführt werden kann. Es ist außerdem eine Erweiterung der Manövrierprognose um den Einfluss von Wind und Wellen denkbar, welche das Einsatzgebiet weiter vergrößert.

DANKSAGUNG

Die Projektpartner danken den türkischen und deutschen Projektträgern – Tübitak bzw. PtJ sowie BMWK – für die finanzielle Förderung des AutoPlan-Projekts im Rahmen des EU-Programms MarTERA. Der Projektleiterin Nalan Erol vom Konsortialführer UZMAR gebührt besonderer Dank für ihre engagierte und gelungene Koordination, die während der Corona-Pandemie besondere Herausforderungen mit sich brachte.

LITERATUR

- [1] Ahmed, O. (2022). Speeding-Up Simulation Driven Design for a High-Speed Planing Boat. Master Thesis, École Centrale de Nantes.
- [2] Cura Hochbaum A. (2006). Virtual PMM tests for manoeuvring prediction. 26th ONR Symposium on Ship Naval Hydrodynamics. Rome, Italy.
- [3] Cura Hochbaum A. und Uharek S. (2014). Prediction of the manoeuvring behaviour of the KCS based on virtual captive tests. Proc. of SIMMAN 2014. Copenhagen, Denmark.
- [4] Cura Hochbaum A., Blum-Thomas B. und Uharek S. (2022). A novel 3+3 DOF method for manoeuvring prediction of planing boats. 34th ONR Symposium on Ship Naval Hydrodynamics. Washington D.C., USA.
- [5] Harries S. (1998). Parametric design and hydrodynamic optimization of ship hull forms. PhD Thesis, Technical University Berlin, Mensch & Buch Verlag, ISBN 3-933346-24-X.
- [6] Harries, S., Ahmed, O. und Uharek, S. (2023). Simulation-driven Design of a fast Monohull. Ship Technology Research, under review.
- [7] Katayama T., Iida T. und Ikeda Y. (2006). Effects of Change in Running Attitude on Turning Diameter of Planing Craft. Proc. 2nd PAAMES and AMEC2006, Jeju Island, Korea.
- [8] Yasukawa H., Hirata N. und Nakayama Y. (2016). High-Speed Ship Maneuverability. Journal of Ship Research, S. Vol. 60, No. 4.

MARTERA-NULIMAS

ENTWICKLUNG EINES NUMERISCHEN MODELLS ZUR UNTERSUCHUNG VON BODEN-
VERFLÜSSIGUNG UM MARINE STRUKTUREN

AUTOREN

CHRISTIAN WINDT	TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
NILS GOSEBERG	TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
HENRIK RUSCHE	WIKKI GMBH
RANJITH K. SHANMUGASUNDARAM	WIKKI GMBH
FRANK ADAM	GICON GMBH
VINAY K. VANJAKULA	GICON GMBH

1. EINLEITUNG

In den letzten Jahren ist eine zunehmende Nutzung maritimer Umgebungen zur Erzeugung erneuerbarer Energien (Wind, Wellen, Gezeiten) zu beobachten (Ocean Energy Europe, 2021). Die Auslegung der erforderlichen Offshore-Anlagen ist aufgrund hoher Anforderungen an (Kosten-)Effizienz, Haltbarkeit und Nachhaltigkeit allerdings herausfordernd. Die Dynamik des Meeresbodens (Erosion und Verflüssigung) um marine Strukturen spielt bei der Auslegung eine besondere Rolle, da potentielle Schäden an den Anlagen besonders schwerwiegend sein können und ggf. zu einem kompletten Versagen der Anlagen führen (Sumer & Kirca, 2021). Unter extremen Bedingungen kann die Reaktion des Meeresbodens aufgrund des Aufbaus von Porenwasserdruck zu einer erheblichen Schwächung des Sediments (Erhöhung der Anfälligkeit für Erosion) und unter Umständen sogar zu Verflüssigung führen, welche den vollständigen Verlust der Tragfähigkeit des Bodens mit sich bringt. Daher ist das Verständnis der welleninduzierten Reaktion des Meeresbodens um marine Strukturen ein wesentlicher Aspekt bei der Gestaltung von Offshore-Anlagen. Zu diesem Zweck sind effiziente Modelle, die die hydrodynamischen, strukturdynamischen und geotechnischen Prozesse vor, während und nach der Verflüssigung des Meeresbodens erfassen, für eine widerstandsfähige Auslegung von maritimer Infrastruktur notwendig.

1.1 Literaturüberblick

Eine große Anzahl analytischer, numerischer und experimenteller Modelle zu verschiedenen Aspekten der Verflüssigung des Meeresbodens findet sich in der Literatur. Eine Übersicht über diese Studien wird beispielsweise in den Arbeiten von (Jeng, 2003), (Sumer B., 2014) und (Sumer & Kirca, 2021) präsentiert.

Basierend auf Biot's Theorie zur Poroelastizität wurden zahlreiche numerische Modelle entwickelt, um die Dynamik des Meeresbodens zu analysieren. Solche Modelle liefern im Allgemeinen eine höhere Genauigkeit im Vergleich zu analytischen Modellen, erfordern

jedoch mehr Rechenaufwand. Während sich erste numerischen Modelle vermehrt auf das Prozessverständnis der Dynamik des Meeresbodens und dessen Verflüssigung konzentrieren (Raman-Nair & Sabin, 1991), (Sakai, 1988), (Zienkiewicz, Chang, & Bettess, 1980) werden in den letzten Jahren auch ingenieurtechnische Probleme im Rahmen der Wechselwirkung von Wellen, Struktur und Boden (Wave-Structure-Soil Interaction, WSSI) berücksichtigt (Jeng, Ye, Zhang, & Liu, 2013), (Zhao, Jeng, Liao, & Zhu, 2017), (Elsafti & Oumeraci, 2016).

Zur Validierung der entwickelten numerischen Modelle werden üblicherweise experimentelle Daten als Referenz herangezogen. Experimentelle Studien können im Allgemeinen basierend auf der Versuchseinrichtung, d.h. Zentrifugen oder Wellenkanälen, unterteilt werden (Sumer B., 2014) (Sumer B., 2014). Ähnlich wie bei der numerischen Modellierung werden experimentelle Versuchskampagnen durchgeführt um die Verflüssigung des Meeresbodens auf Prozessebene zu analysieren (z.B. (Sumer B., 2006) (Sumer, Kirca, & Fredsøe, 2012), aber auch um ingenieurtechnische Probleme im Zusammenhang mit WSSI zu untersuchen (z.B. (Kudella, Oumeraci, de Groot, & Meijers, 2006)).

Aus den in der Literatur vorhandenen numerischen Studien ist zu erkennen, dass kein ganzheitliches numerisches Modell für die Verflüssigung des Meeresbodens, einschließlich des Aufbaus von Porenwasserdruck, der Verflüssigung und der anschließenden Verdichtung, verfügbar ist. Des Weiteren lässt sich bei der Betrachtung der experimentellen Studien feststellen, dass keine Studien speziell für die Kalibrierung und Validierung von numerischen Modellen durchgeführt werden. Daher fehlen in der vorhandenen Literatur in der Regel wichtige Informationen für eine genaue Validierung der Modelle.

1.2 Zielstellung

Die identifizierten Wissenslücken liefern die Motivation für das Projekt "Numerische Modellierung von Verflüssigung um marine Strukturen" (NuLIMAS, 2020) zur Entwicklung eines ganzheitlichen, auf OpenFOAM® basierenden, numerischen Modells für die Bodenverflüssigung. Die Modellentwicklung kann in die folgenden drei Schritte unterteilt werden:

- (i) Numerische Implementierung;
- (ii) Modellkalibrierung;
- (iii) Modellvalidierung.

Für die Schritte (ii) und (iii) sind spezifische experimentelle Testkampagnen im kleinen bzw. großen Maßstab geplant. Dabei wird für die großmaßstäblichen Versuche zur Modellvalidierung die schwimmende Offshore-Windturbine des Typs Tension-Leg-Plattform (TLP) von GICON® als Fallstudie verwendet (siehe Abb. 1). Dieser Beitrag liefert einen Überblick über das NuLIMAS-Projekt und zielt darauf ab:

- › Details zur numerischen Implementierung und den experimentellen Testkampagnen darzustellen.
- › Erste Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen im kleinen Maßstab und der numerischen Modellverifizierung zu präsentieren.
- › Die relevanten zukünftigen Arbeiten zu identifizieren.

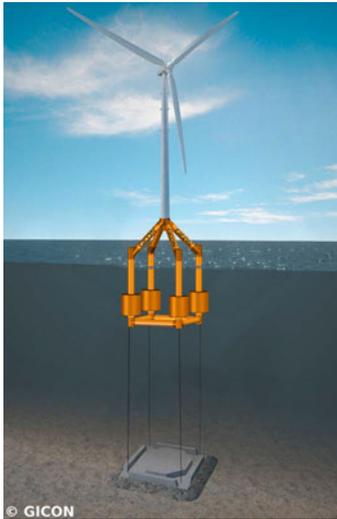


Abb. 1: Rendering der schwimmenden Offshore Windenergieanlage von GICON® (Darstellung genehmigt durch GICON®)

2. MEERESBODENVERFLÜSSIGUNG

Auf Grund des Aufbaus von Porenwasserdruck kann der Meeresboden seine Tragfähigkeit verlieren. Dieser Aufbau von Porenwasserdruck wird durch zyklische Scherbelastung ausgelöst, die beispielsweise durch seismische Belastung oder Meereswellen entsteht. Die physikalischen Prozesse, die zur Verflüssigung des Meeresbodens führen, sind schematisch in Abb. 2 dargestellt.

Wenn Scherbelastung auf ein Volumen locker gepackten Meeresboden ausgeübt wird, können sich die Sandkörner neu anordnen und zeigen eine Tendenz zur Kontraktion, was zu einer Verringerung des Porenvolumens im Boden führt. Diese Verringerung des Porenvolumens führt zu einem Anstieg des Porendrucks und wiederum dazu, dass das Porenwasser aus dem Porenvolumen fließt. Wenn der Ausfluss des Porenwassers aus dem Boden möglich ist, dissipiert der erhöhte Porendruck (Abb. 2 (b.1)). Unter undrainierten Bedingungen ist diese Dissipation nicht möglich und bei weiterer Scherung wird ein Porenwasserdruck aufgebaut (Abb. 2 (b.2)). Gemäß des Prinzips von Terzaghi führt der erhöhte Porenwasserdruck zu einer Reduzierung der normalen effektiven Spannung im Boden bis zu einem Punkt, an dem der Boden verflüssigt und seine Tragfähigkeit verliert (Abb. 2 (c)).

Nachdem die Verflüssigung einsetzt, führt ein Druckgefälle zu einer Setzung der Sandkörner. Diese Verdichtung (d. h. der Wechsel von flüssigem zu festem Boden) beginnt vom unteren undurchlässigen Rand und bewegt sich in Richtung des oberen Randes. Eine ausführliche Beschreibung der Meeresbodenverflüssigung findet sich in (Sumer B., 2014).

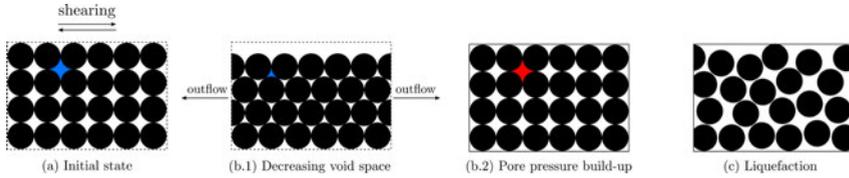


Abb. 2: Schematische Darstellung der physikalischen Prozesse der Meeresbodenverflüssigung. Der in blau dargestellte Hohlraum zeigt an, dass kein Porenwasserdruck aufgebaut wird. Der rote Hohlraum zeigt an, dass Porenwasserdruck aufgebaut wird. (Abbildung entnommen von (Windt, et al., 2023))

2.1 Modellierung von Meeresbodenverflüssigung

Wenn der Meeresboden als poro-elastischer fester Boden betrachtet wird, werden Modelle zur Beschreibung der maßgebenden Größen, d.h. des Porendrucks und der Scherspannungen, durch die Theorie für poro-elastischen Medien nach (Biot, 1941) beschrieben. Darin werden zwei Gleichungen, die Biot-Konsolidierungsgleichungen, abgeleitet, um das Gleichgewicht des linearen Impulses (Gl. (1)) und die Kontinuität der Porenflüssigkeit (Gl. (2)) zu beschreiben.

$$G\nabla^2 U + \frac{G}{1-2\nu}\nabla\epsilon = \nabla p \quad (1)$$

$$\frac{k}{\gamma}\nabla^2 p = \frac{n}{K'}\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial\epsilon}{\partial t} \quad (2)$$

In Gl. (1) und (2) beschreibt G das Schermodul, U den Verschiebungsvektor, ν die Poisson-Rate, ϵ die Volumenzunahme pro Volumeneinheit des Bodens, p den Porenwasserdruck, k die hydraulische Leitfähigkeit, γ das spezifische Gewicht, n die Porosität und K' das Volumen-Elastizitätsmodul von Wasser. Eine genaue Herleitung der Gleichungen kann (Sumer B., 2014) entnommen werden. In (Sumer B., 2014) wird ebenfalls eine formale Beschreibung des Aufbaus von Porenwasserdruck über einen Quellterm beschrieben. Bodenverflüssigung setzt dann ein, wenn der aufgebaute Porenwasserdruck, P , die normalen effektiven Spannung, σ' , übersteigt.

Nach einsetzen der Verflüssigung verhält sich der Boden wie eine hochviskose Flüssigkeit und die konstitutive Beschreibung ändert sich hin zu einem Zweiphasen-Problem mit Sandkörnern und Wasser. Dieses Zweiphasen-Problem kann mit Hilfe eines *Drift-Flux*-Modells gelöst werden. Dabei werde die Kontinuitätsgleichungen und Impulsbilanzen der einzelnen Phasen zu einer einzigen Kontinuitätsgleichung und einer einzigen Impulsbilanz für die gesamte Mischung zusammengefasst. Eine genaue Definition der *Drift-Flux*-Gleichungen kann (Windt, et al., 2023) entnommen werden.

Die Biot-Gleichungen im Modellbereich des festen Bodens liefern Lösungen für den Porenwasserdruck und die Verschiebung, während die *Drift-Flux*-Gleichungen im Modellbereich des verflüssigten Bodens Lösungen für Druck, Geschwindigkeit und den Volumenanteil liefern. Die Gleichungen sind durch Indikatorfunktionen gekoppelt, die die relevanten Gleichungen im Berechnungsgebiet ein- und ausschalten. An den Grenzen zwischen festem und flüssigem Boden werden die Randbedingungen so gesetzt, dass Druck, Geschwindigkeit und Verschiebungen des festen und verflüssigten Bereichs gleich sind.

3. NUMERISCHE IMPLEMENTIERUNG

Das NuLIMAS-Projekt zielt darauf ab, ein ganzheitliches Modell für die Verflüssigung um marine Strukturen zu entwickeln, einschließlich des Aufbaus von Porendruck, des Wechsels des Bodens von fest zu flüssig zu fest, sowie der Bewegung des Schweregewichtsankers in sechs Freiheitsgraden (DoF). Zu diesem Zweck werden die maßgebenden Gleichungen für den Prozess der Bodenverflüssigung, wie in Abschnitt 2 dargestellt, numerisch implementiert. Eine schematische Darstellung des numerischen Modellgebiets ist in Abb. 3 dargestellt.

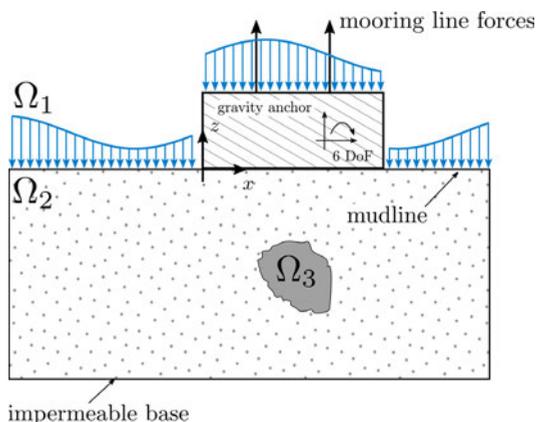


Abb. 3: Schematische Darstellung des numerischen Modellgebiets zur Modellierung der Meeresbodenverflüssigung um marine Strukturen (Abbildungen entnommen von (Shanmugasundaram, et al., 2022))

Die Wellenbelastung wird im numerischen Modell durch eine zeitlich variierende Druckrandbedingung (Ω_1 in Abb. 3) berücksichtigt. Durch Vernachlässigung einer expliziten Auflösung der freien Oberfläche durch ein Mehrphasenmodell zur Wellenmodellierung wird die Effizienz des entwickelten Modells erheblich gesteigert. Der feste Boden (Ω_2 in Abb. 3) wird als poroelastischer Festkörper inklusive des Aufbaus von Porenwasserdruck mittels Quellterm modelliert. Sobald der Boden verflüssigt ist (Ω_3 in Abb. 3), wird das *Drift-Flux*-Modell genutzt.

3.1 Vorläufige Ergebnisse

Erste Ergebnisse der Modellierung des Porendruckaufbaus werden in (Shanmugasundaram, et al., 2022) dargestellt. Im Folgenden werden kurz die Ergebnisse der Modellierung des Zustandswechsels von fest zu flüssig und von flüssig zu fest gezeigt.

Von fest zu flüssig

Um einen ersten Test der Implementierung des Wechsels von fest zu flüssig durchzuführen, wird eine Fallstudie von Sumer, Kirca, & Fredsøe (2012) betrachtet. Die relevanten Boden- und Welleneigenschaften können (Windt, et al., 2023) entnommen werden. Ein einfaches rechteckiges Modellgebiet, ähnlich wie in Abb. 3, wird generiert um den Bodenbereich darzustellen. Die Länge des betrachteten Modellgebiets entspricht einer Wellenlänge und die Höhe entspricht der Bodentiefe h . Abb. 4 zeigt die Ausbreitung der Verflüssigungsfront unter der Einwirkung von Wellen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Verflüssigung am oberen Rand des Modellgebiets einsetzt und sich in Richtung des undurchlässigen unteren Rands fortsetzt. Dieses Verhalten wurde ebenfalls von Sumer, Kirca, & Fredsøe (2012) beobachtet.

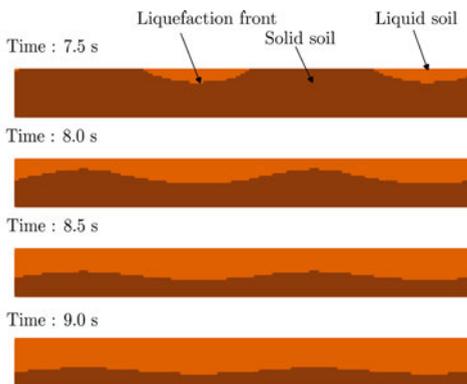


Abb. 4: Beispielergebnisse der Ausbreitung der Verflüssigungsfront unter dem Einfluss von Wellen. Die Farbcodierung dient als Indikatorfunktion: Dunkelbraun bezieht sich auf festen Boden; Hellbraun bezieht sich auf verflüssigten Boden.

Flüssig zu fest

Auf Basis der selben Fallstudie wird die Implementierung des Zustandswechsels von flüssig zu festem Boden getestet. Zu diesem Zweck wird die Ergebnisse der vorherigen Simulation nach 9,5s als Startbedingungen für eine Simulation ohne Wellenbelastung genutzt. Abb. 5 zeigt die Verteilung des Volumenanteils der Sandkörner zu vier verschiedenen Zeitpunkten. Die Ergebnisse zeigen, dass sich das Wasser aufgrund des vorherrschenden Druckgradienten nach oben bewegt, während der Boden sich absetzt. Im Gegensatz dazu setzt sich der Boden an der unteren Modellgrenze ab und erhöht den Volumenanteil der Sandkörner. Dies entspricht den experimentellen Beobachtungen von Sumer, Kirca, & Fredsøe (2012).

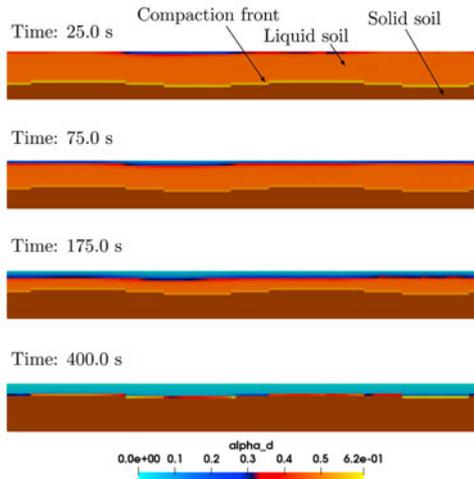


Abb. 5: Beispielergebnisse der Verdichtung des verflüssigten Bodens. Die Farbcodierung hier bezieht sich auf den Volumenanteil der Sandkörner.

4. EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Wie in Abschnitt 1 erwähnt, werden spezielle experimentelle Testkampagnen im Rahmen des NuLIMAS-Projekts begleitend zur Entwicklung des numerischen Modells durchgeführt. Für die Modellkalibrierung, d.h. die Anpassung der zugrundeliegenden Modellierungskonstanten, werden Experimente im kleinen Maßstab durchgeführt. Zur Modellvalidierung wird eine realistische Fallstudie einer schwimmenden Offshore-Windenergieanlage im Maßstab 1/15 verwendet.

4.1 Kleinskalige Experimente

Für die Kalibrierung werden Referenzdaten für die Verflüssigung des Meeresbodens auf Prozessebene benötigt, damit die erforderlichen Modellierungskoeffizienten (z. B. Poisson-Rate und Permeabilitätskoeffizient) angepasst und grundlegende Modellannahmen verifiziert werden können. Zu diesem Zweck wurden Versuche in den experimentellen Versuchseinrichtungen des Projektpartners IBW-PAN, Polen, durchgeführt (siehe Abb. 6).

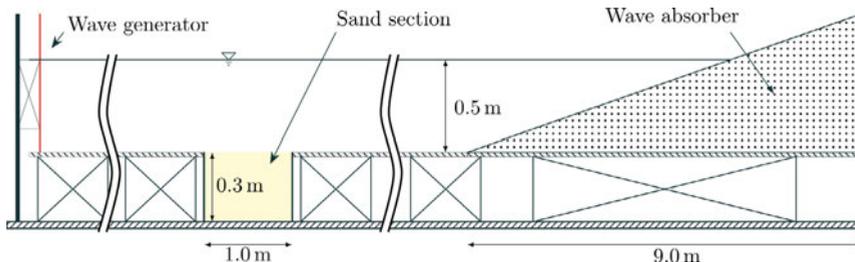


Abb. 6: Wellenkanal des Projektpartners IBW-PAN für die untersuchen kleinskaliger Untersuchung der Bodenverflüssigung.

Insgesamt wurden vier verschiedene Testfälle unterschiedlicher Komplexität in den kleinskaligen Untersuchungen betrachtet. Zunächst wird nur die Wellenbelastung auf dem Meeresboden betrachtet und der Porenwasserdruck an vier spezifischen Stellen im Boden gemessen. Dabei wurden 19 verschiedene Wellenbedingungen (vier Wellenhöhen, fünf Wellenperioden) getestet. Unter Beibehaltung der hydraulischen Randbedingungen wird anschließend ein verkleinerter Schwergewichtstanker auf dem Sediment platziert und der Porenwasserdruck erneut gemessen. In einem dritten Aufbau wird die Wellenbelastung vernachlässigt, während die Fundamentplatte extern angeregt wird. Der Porenwasserdruck wird an vier Stellen im Boden gemessen. Letztlich wird das Absenken des Ankers nachgebildet, indem das Fundament auf den Boden abgelassen wird. Die Anregung durch Wellen wird erneut vernachlässigt. Im Vorfeld der Versuche wurden Triaxial-Scherversuche durchgeführt, um die Bodeneigenschaften zu bestimmen und die Ergebnisse sind in (Kazimierowicz-Frankowska, et al., 2022) dokumentiert.

Vorläufige Ergebnisse

Basierend auf der Testmatrix aus Wellenhöhe und Perioden wurde die Verflüssigung nur für einen bestimmten Teil der Wellenbedingungen beobachtet. Eine klare Abhängigkeit der Anfälligkeit des getesteten Bodens für Verflüssigung von der Wellenhöhe kann identifiziert werden. Insbesondere führen Wellen mit einer Wellenhöhe von $H=0.05$ m nicht zu Verflüssigung, unabhängig von den getesteten Wellenperioden. Mit zunehmender Wellenhöhe ($H \geq 0.10$ m) konnte bei fast allen getesteten Perioden eine Verflüssigung beobachtet werden.

Abb. 7 (a) und (b) zeigen die Zeitreihen des gemessenen Porendrucks in verschiedenen Tiefen des Bodens (0,10 m, 0,15 m, 0,20 m, 0,25 m unterhalb der Sole) für Wellenperioden zwischen 0,9 s und 1,7 s. Abb. 7 (a) zeigt den Porendruck über die gesamte Dauer der Experimente (d.h. 25 min), während Abb. 7 (b) nur die ersten 60 s zeigt. Die durchgezogenen schwarzen Linien zeigen den mittleren normalen effektiven Spannungswert σ'_o . Alle Ergebnisse beziehen sich auf eine Wellenhöhe $H=0.15$ m.

Aus Abb. 7 (a) können einige spezifische Merkmale des Porendruckaufbaus beobachtet werden. Der Porendruckaufbau für die Wellenperioden $T = 1,7$ s, $1,5$ s und $1,3$ s zeigt sehr ähnliche Verläufe kurz nach Beginn der Experimente. Nach Einsetzen der Druckdissipation gehen die Verläufe auseinander. Die langsamste Dissipation kann für $T = 1,3$ s beobachtet werden.

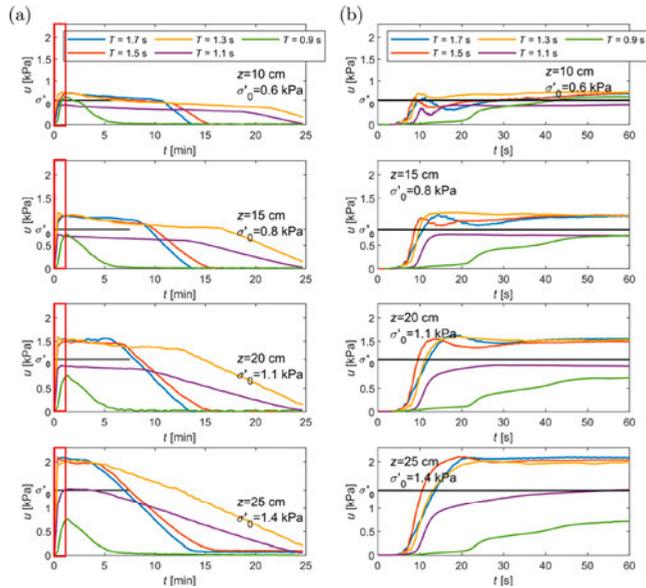


Abb. 7: Zeitreihe des gemessenen Porendrucks in verschiedenen Tiefen im Boden für Wellenperioden zwischen 0,9 s und 1,7 s über die gesamte Dauer des experimentellen Tests (a) sowie vergrößert für die ersten 60 s (b). Die rote Box in (a) zeigt den Ausschnitt an, der vergrößert wird. Die durchgezogenen schwarzen Linien stellen die mittlere normale effektive Spannung dar. Alle Ergebnisse beziehen sich auf eine Wellenhöhe $H = 0.15$ m.

4.2 Grossskalige Experimente

Für die Modellvalidierung wird ein realistischer Testfall einer schwimmenden Offshore-Windenergieanlage (siehe Abb. 1) im Maßstab 1/15 betrachtet und Porenwasserdrücke und Fundamentverschiebungen gemessen. Die Tests werden in der Großen Wellen-Strömungskanal (GWK+) am Forschungszentrum Küste, Hannover, durchgeführt. Der Kanal, mit Abmessungen von 307 m × 5 m × 7 m (Länge × Breite × Tiefe), ist speziell für die Untersuchungen von Extrembelastungen auf Offshore-Strukturen ausgelegt und kann Wellen mit Höhen von bis zu 3,0 m und Perioden von bis zu 10,0 s erzeugen.

Der Kanal ist ebenfalls mit einem Tieftteil ausgestattet um morphodynamische und geotechnische Untersuchungen durchzuführen. Für die im Rahmen des NuLIMAS-Projekts durchgeführten Versuche wird ein Abschnitt des Tieftteils verwendet um ein Sedimentbett mit Dimensionen 6 m × 5 m × 1 m (Länge × Breite × Tiefe) aufzubauen.

Ähnlich wie bei den Versuchen im kleinen Maßstab werden verschiedene Aufbauten unterschiedlicher Komplexität für die Untersuchungen genutzt. Zunächst wird lediglich Wellenbelastung auf dem Meeresboden berücksichtigt. Ein Aufbau mit dem Model der Offshore-Windenergieanlage bildet den zweiten Testfall. Für diese Tests wird das Fundament auf dem locker gelagerten Meeresboden installiert. Die schwimmende Struktur (siehe Abb. 8) ist über vier Verankerungsleinen mit dem Fundament verbunden. Die Verschiebung des Fundaments wird mittels Echolot gemessen, während die Belastung der Verankerungsleinen mit Hilfe von Kraftsensoren gemessen wird.

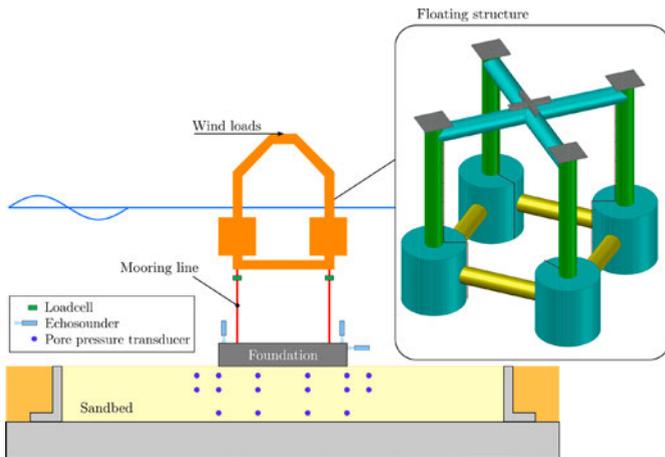


Abb. 8: Schematische Darstellung des großskaligen Versuchsaufbaus.

Um realistische Belastungen auf die Struktur zu berücksichtigen, werden nicht nur Wellen-, sondern auch Windbelastungen berücksichtigt. Für letztere wird im Rahmen des NuL-MAS-Projekts ein Hardware-in-the-Loop (HIL) System entwickelt. Das HIL-System ermittelt Windbelastungen in Echtzeit auf der Grundlage des vorgegebenen Windfelds und der während der Experimente gemessenen Verschiebungsdaten der schwimmenden Struktur. Ein numerisches Modell wird dann verwendet, um die Belastung auf die schwimmende Struktur zu berechnen. Hierbei werden nur die Aerodynamik berücksichtigt, Turm- und/oder Rotorblattdynamik werden vernachlässigt. Eine Prüfstand des Antriebs inklusive Rotor, Elektromotor und Stromversorgung ist in Abb. 9 gezeigt.

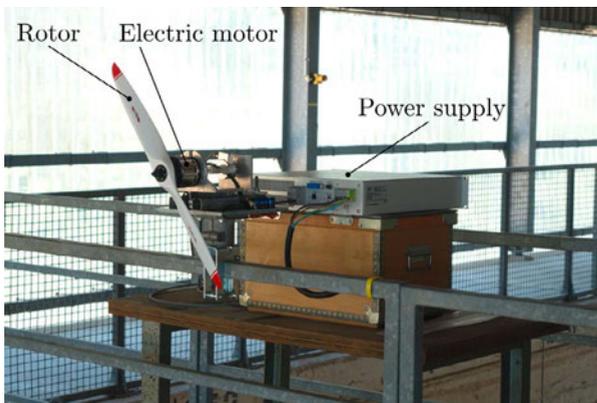


Abb. 9: Prüfstand für den Antriebsstrang des HIL Systems mit Propeller, Elektromotor, und Stromversorgung.

5. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Folgende Schlussfolgerungen können aus den Ergebnissen dieses Beitrags gezogen werden:

- › Im Rahmen des NuLIMAS-Projekts werden die maßgebenden Gleichungen für poroelastischen Boden, Porendruckaufbau, Verflüssigung und Verdichtung im Open-FOAM®-Framework formuliert und implementiert. Während die etablierten Biot-Konsolidierungsgleichungen für das Verhalten des poroelastischen Bodens verwendet werden, wird ein Quellterm und ein Drift-Flux-Modell für den Porendruckaufbau und die Verflüssigung/Verdichtung verwendet.
- › Die ersten Simulationen der Meeresbodenverflüssigung und Verdichtung zeigen vielversprechende Ergebnisse, die als wesentlicher Schritt zur Modellierung von WSSI dienen.
- › Klein- und großmaßstäbliche Experimente der Bodenverflüssigung erfordern eine sorgfältige und zeitaufwändige Vorbereitung und Durchführung; sie liefern jedoch wichtige Erkenntnisse bzgl. der Korrelation zwischen hydraulischen Randbedingungen und der Anfälligkeit des Meeresbodens für Verflüssigung.
- › Zukünftige Arbeiten umfassen die Kalibrierung und Validierung des numerischen Modells anhand der experimentellen Daten sowie die Implementierung der Bewegung von Strukturen. Eine weitere Analyse der experimentellen Daten aus den kleinskaligen Versuchen ist erforderlich.

FÖRDERUNG

Diese Arbeit wurde durch das dreijährige (2020-2023) Forschungsprojekt NuLIMAS im Rahmen des ERA-NET Co-fund MarTERA des EU-Horizont-2020-Programms (FKZ: 728053) gefördert. Die Förderung wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (FKZ: 03SX524), dem Wissenschaftlichen und Technologischen Forschungsrat der Türkei (FKZ: TEYDEB-1509/9190068) und dem Polnische Nationale Zentrum für Forschung und Entwicklung (FKZ: MarTERA-2/NuLIMAS/3/2021) bereitgestellt.

LITERATUR

- [1] Biot, M. (1941). General theory of three-dimensional consolidation. *Journal of applied physics*, pp. 155-164.
- [2] Elsafti, H., & Oumeraci, H. (2016). A numerical hydro-geotechnical model for marine gravity structures. *Computers and Geotechnics*, 105-129.
- [3] Jeng, D. (2003). Wave-induced sea floor dynamic. *Applied Mechanics Reviews*, 407-429.
- [4] Jeng, D., Ye, J.-H., Zhang, J.-S., & Liu, P.-F. (2013). An integrated model for the wave-induced seabed response around marine structures: Model verifications and applications. *Coastal Engineering*, 1-19.
- [5] Kazimierowicz-Frankowska, K., Kulczykowski, M., Majewski, D., Mierczyński, J., & Smyczyński, M. (2022). The effect of the height of the regular wave on seabed liquefaction. *Proceedings of the ASME 2022 41st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, (S. 1-7). Hamburg, Germany.
- [6] Kudella, M., Oumeraci, H., de Groot, M., & Meijers, P. (2006). Large-Scale Experiments on Pore Pressure Generation underneath a Caisson Breakwater. *JOURNAL OF WATERWAY, PORT, COASTAL, AND OCEAN ENGINEERING*, 310 - 324.
- [7] NuLIMAS. (2020). NuLIMAS project website. Von <http://www.nulimas.info> abgerufen
- [8] Ocean Energy Europe. (2021). *Ocean Energy - Key trends and statistics 2020*. OES.
- [9] Raman-Nair, W., & Sabin, G. (1991). Wave-induced failure of poroelastic seabed slopes: A boundary element study. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, 771-794.
- [10] Sakai, T. (1988). Effects of inertia and gravity on seabed response to ocean waves. *Modeling Soil-Water-Structure interactions*, 61-66.
- [11] Shanmugasundaram, R. K., Rusche, H., Windt, C., Kirca, Ö., Sumer, B. M., & Goseberg, N. (2022). Towards the Numerical Modelling of Residual Seabed Liquefaction Using OpenFOAM. *OpenFOAM Journal*, S. 94-115.
- [12] Sumer, B. (2006). Editorial: Special issue on liquefaction around marine structures: Processes and benchmark cases. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, S. 225-226.
- [13] Sumer, B. (2014). Advances in seabed liquefaction and its implications for marine structures. *Geotechnical Engineering*, 2-14.
- [14] Sumer, B. (2014). *Liquefaction Around Marine Structure*. World Scientific.
- [15] Sumer, B., & Kirca, V. (2021). Scour and liquefaction issues for anchors and other subsea structures in floating offshore wind farms: A review. *Water Science and Engineering*, 3-14.

- [16] Sumer, B., Kirca, V., & Fredsøe, J. (2012). Experimental validation of a mathematical model for seabed liquefaction under waves. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*.
- [17] Windt, C., Shanmugasundaram, R., Schimmels, S., Kudella, M., Rusche, H., Sumer, B., Goseberg, N. (2023). Development and validation of a numerical model for liquefaction around marine structures. *Proceedings of the the 33rd International Ocean and Polar Engineering Conference*. Ottawa, Canada.
- [18] Zhao, H., Jeng, D., Liao, C., & Zhu, J. (2017). Three-dimensional modeling of wave-induced residual seabed response around a mono-pile foundation. *Coastal Engineering*, 1-21.
- [19] Zienkiewicz, O., Chang, C., & Bettess, P. (1980). Drained, undrained, consolidating and dynamic behaviour assumptions in soils. *Geotechnique*, 385-395.

MARTERA - DDD-BATMAN

DATA-DRIVEN DEGRADATION MONITORING AND PREDICTION OF BATTERIES
FOR MARITIME APPLICATIONS

AUTOREN

VANESSA GRENZKE

CARNIVAL MARITIME GMBH

MAXIMILIAN BRUCH

FRAUNHOFER ISE

1. EINLEITUNG UND MOTIVATION

Der Einsatz von Batteriesystemen zur Energiespeicherung an Bord ist für viele Segmente der Schifffahrt eine attraktive Alternative, sowohl aus wirtschaftlicher Sicht mit erheblichem Potenzial für Kosteneinsparungen als auch aus ökologischer, regulatorischer und gesellschaftlicher Perspektive. Allerdings muss die Sicherheit batteriebetriebener Schiffe gewährleistet sein. Ein entscheidender Aspekt ist die Fähigkeit, den Energiebedarf für einen sicheren und zuverlässigen Antrieb, die Manövrierfähigkeit und den Betrieb zu jedem Zeitpunkt des Betriebs zu decken. Daher sind eine zuverlässige Schätzung und Vorhersage der in der Batterie gespeicherten Energie von größter Bedeutung.

Das Ziel des Forschungs- und Entwicklungsprojekts DDD-BATMAN ist die Entwicklung datengesteuerter Methoden zur Prognose von Batteriesystemen und die Bereitstellung von Mitteln zur Verifizierung des Alterungszustands der Batterie (engl.: state of health, kurz: SOH) basierend auf Echtzeit-Sensormessungen. Die derzeit verfügbaren Analysemodelle bieten bisher nur unzureichende Sicherheit bei der Berechnung der verfügbaren Restenergie im Batteriesystem. Eine solche Validierung erfolgt derzeit durch einen jährlichen Kapazitätstest, der jedoch mehrere Einschränkungen aufweist und in der Regel erfordert, dass das Schiff vorübergehend außer Betrieb genommen wird. Es wird angenommen, dass kontinuierliche Sensormessungen genauere und zuverlässigere Schätzungen des SOH der Batterie ermöglichen, wodurch Schwankungen bei Ladung, Temperatur und Entladungstiefe berücksichtigt werden können.

Operative Daten sind notwendig und werden im Rahmen des Projekts von in Betrieb befindlichen Schiffen gesammelt. Zusätzliche Erkenntnisse werden aus Labortests unter variablen Bedingungen gewonnen. Der Fokus liegt auf Aspekten, die sich auf Batteriesysteme für Kreuzfahrtschiffe beziehen, einschließlich ihrer Lebensdauer, Austauschstrategien und Lebenszyklusanalyse (engl.: Life-Cycle-Assessment, kurz: LCA). Das Projekt wird neue Standards für Zuverlässigkeit und Lebensdauerprognosen setzen, Empfehlungen abgeben und Input für Standards, empfohlene Verfahren und Klassenregeln liefern.

Die Schwerpunkte der F&E-Arbeiten sind:

- › Identifikation von relevanten Datenströmen und Bereitstellung operativer Daten, die für den Datenanalyseteil dieses Projekts notwendig sind
- › Durchführung von Labortests an Batteriezellen, um Daten zu Alterungs- und Degradationsmechanismen bereitzustellen
- › Entwicklung und Erprobung datengesteuerter Modelle zur zuverlässigen Ermittlung des SOH und der aktuell verfügbaren Energie auf Grundlage operativer Betriebsdaten
- › Ausarbeitung einer Konzept-/Machbarkeitsstudie für Batteriesysteme auf Kreuzfahrtschiffen unter Berücksichtigung der Schiffsbetriebssicherheit während und nach der Installation sowie einer Untersuchung des umwelttechnischen Nutzens der Batterieinstallation
- › Vorarbeiten für zukünftige Regeln und Standards im Zusammenhang mit maritimen Batteriesystemen

2. BATERIEZELLTEST UND ERSATZSCHALTBILDMODEL

Zum besseren Verständnis der Alterung und zur Entwicklung und Validierung neuer Zustandsbestimmungsverfahren werden nicht nur die Betriebsdaten der im Einsatz befindlichen Schiffsbatterien analysiert, es werden auch im Labor Batteriezellen vermessen. Dies erlaubt es gezielt Tests durchzuführen, die zur exakten Erfassung des Alterungsverhaltens, Parametrisierung von Simulationsmodellen oder zur Verifizierung von Zustandsbestimmungsalgorithmen dienen.

Insgesamt werden im Projekt drei verschiedene Batteriezellen untersucht, die sich in Größe, Format und den zugrundeliegenden Aktivmaterialien unterscheiden. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die verwendeten Zellen.

Tab. 1: Batteriezellen, die im Projekt betrachtet werden.

Zellformat	Zylindrisch (18650)	Zylindrisch (18650)	Folienbeutel (Pouch)
Kapazität	2,5 Ah	3,5 Ah	64 Ah



Um die Batteriezellen zu Charakterisieren wird ein spezielles Messprotokoll verwendet. Es besteht im Wesentlichen aus einem vollständigen Lade- und Entladezyklus mit geringer, kontinuierlicher Stromstärke, um die Kapazität zu ermitteln, und einem Lade- und Entladezyklus mit Strompulsen verschiedener Stromstärken zur Messung des Innenwider-

stands über den gesamten Ladezustandsbereich. Dieses Messprotokoll durchlaufen die Zellen initial und periodisch zwischen Tests in denen die Zellen gezielt belastet bzw. gealtert werden.

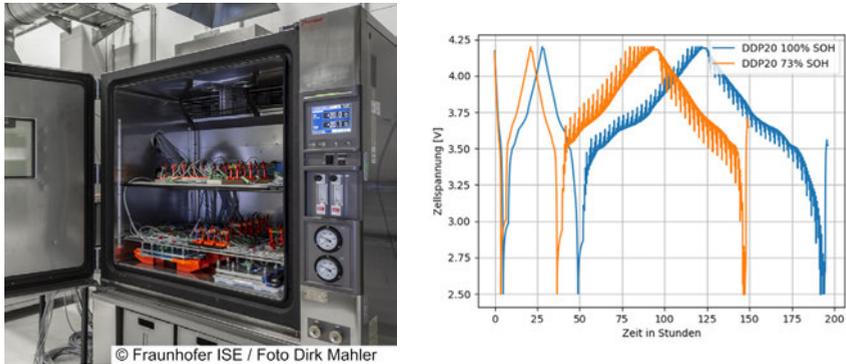


Abb. 1: Links: Test der Batteriezellen in einer Temperaturkammer. Im oberen und mittleren Regal sind die zylindrischen Zellen (DDE und DDP) zu sehen. Links auf dem Boden der Temperaturkammer stehen hintereinander drei zwischen Aluminiumplatten verspannte Pouchzellen (DDF). Rechts: Beispielhaft ein Check-up-Test einer neuen und einer gealterten Zelle. Mit bloßem Auge ist erkennbar, dass durch die geringere Kapazität bei gleichem Stromprofil die Lade- und Entladespannungsgrenzen schneller erreicht und der Test somit kürzer ist. Auch der gestiegene Innenwiderstand lässt sich anhand der größeren Spannungsspitzen beim Pulsladen und Pulsentladen erkennen.

Aus diesen Charakterisierungs- oder Check-up-Messungen kann auch ein Simulationsmodell der Zelle gewonnen werden. Hierbei handelt es sich um ein Ersatzschaltbildmodell, das das elektrische Verhalten der Zelle mittels einfacher Schaltelemente (Widerstände, Kapazitäten und Spannungsquellen) nachstellt. In Abbildung 2 ist das verwendete Model dargestellt. Zur Bestimmung der Modelparameter aus den Check-up-Messungen wird ein etabliertes Verfahren [1], das am Fraunhofer ISE entwickelt wurde, verwendet.

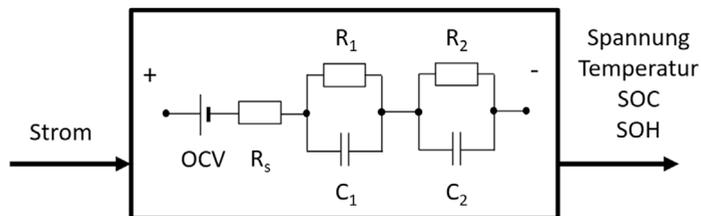


Abb. 2: Empirische Nachbildung der Batteriezelle mittels Ersatzschaltbildmodell. Die Leerlaufspannung (engl.: open circuit voltage, kurz: OCV) ist dabei abhängig vom Ladezustand (engl.: state of charge, kurz: SOC) und die Widerstände und Kapazitäten haben zusätzlich eine Abhängigkeit von Temperatur und SOH (engl.: state of health, kurz: SOH). Die Anzahl der RC-Elemente (parallele Widerstands- und Kapazitätselemente) kann variiert werden.

Neben den elektrischen Eigenschaften wird auch das thermische Verhalten der Zelle simuliert. Hierfür wird ein einfaches Model mit einer thermischen Kapazität und thermi-

sche Leitfähigkeit an eine konstante Umgebungstemperatur verwendet. Die Erwärmung der Zelle wird dabei durch die in den Widerständen entstehende Joulesche Wärme definiert, die den Hauptteil der Verluste ausmacht, sowie der Wärmeabgabe und -aufnahme, die durch die Entropieänderung beim Laden und Entladen anfällt (thermisches Batteriemodell nach Bernardi et al. [2]).

In Abbildung 3 ist die Verifikation des Batteriemodells (Zelltyp DDF) mit einer Labormessung dargestellt. Die Belastung der Zelle ist dabei der realen, maritimen Anwendung nachempfunden (synthetisches Lastprofil). Es ist zu erkennen, dass das Simulationsmodell nur eine geringfügige Abweichung von 7,7 mV bzw. 0,64% (bei einem Zellspannungsbereich von 3,0V bis 4,2V) aufweist.

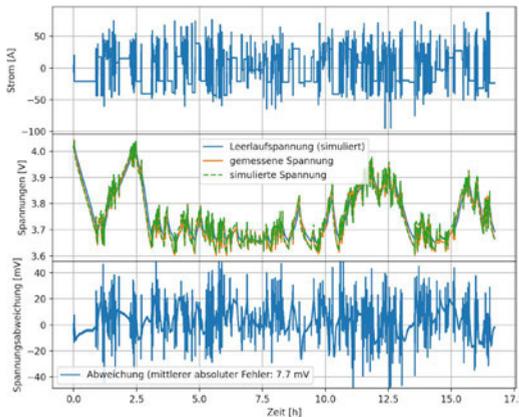


Abb. 3: Oben das dynamische, synthetische Stromprofil, das in der Labormessung an die Zelle angelegt wurde und dass die Eingangsgröße der Simulation ist. Im mittleren Diagramm sind die gemessene Zellspannung sowie die mittels Ersatzschaltmodell simulierte Spannung und die Leerlaufspannung (interne, nicht messbare Größe) gegenübergestellt. Die Kurve unten zeigt die Abweichung der gemessenen und simulierten Spannung, was neben der Temperatur eine der wichtigsten und komplexesten Ausgangsgrößen der Simulation ist.

Das Model ist also in der Lage die Batteriespannung und -temperatur abzubilden. Aber auch indirekte nicht direkt messbare Größen, wie die interne Temperatur, der Ladezustand und der Alterungszustand (mehr hierzu im Folgekapitel) können bestimmt werden. Diese synthetischen Daten können zum Training von datengetriebenen Algorithmen bzw. einer künstlichen Intelligenz verwendet werden, die dann in der Lage ist, diese internen Größen anhand der eingegebenen Betriebsdaten (Spannungs-, Strom- und Temperaturverlauf) zu bestimmen. Somit können für die Entwicklung von Zustandsbestimmungsalgorithmen nicht nur Feld- und Labordaten verwendet werden, wobei diese nachträglich noch um die nicht direkt messbaren Informationen (SOC, SOH, etc.) ergänzt werden müssen, sondern es können ergänzend oder ausschließlich diese synthetischen Daten aus der Simulation benutzt werden.

Natürlich kann das Simulationsmodell darüber hinaus auch für viele andere Aufgaben wie die Berechnung der Kraftstoffeinsparung durch die Hybridisierung, die Auslegung

der Batterie für neue Schiffe und Schiffe in der Flotte oder dem Zeitpunkt ab dem bei der Hafeneinfahrt auf reinen Batteriebetrieb umgeschaltet werden kann, verwendet werden.

3. ALTERUNGSTEST UND ALTERUNGSZUSTANDSBESTIMMUNG

Da es verschiedenste, äußerst komplizierte Effekte gibt, die zur Alterung einer Lithium-Ionen-Batterie beitragen ist es aktuell nicht möglich auf rein theoretischer Grundlage das Alterungsverhalten zu beschreiben. Dies ist Aufgabe einer Vielzahl von Grundlagenforschungprojekten und nicht Teil dieses Vorhabens. Stand der Technik ist eine empirische Beschreibung der Alterung, die sich auf gesammelte Labor- oder Felddaten stützt. Ziel ist es die Effekte der Alterung zu messen und analysieren. Diese zeigen sich als eine Abnahme der speicherbaren elektrischen Ladung (Kapazitätsverlust) und einem Anstieg des Innenwiderstands (stärkere Erwärmung der Batterie, schlechterer Wirkungsgrad). Beide Größen werden in den Check-up-Messungen (siehe voriges Kapitel) bestimmt. Zwischen diesen Messungen kann eine Batteriezelle nun gezielt belastet werden, um zu bestimmen, wie diese spezifische Nutzung die Kapazität und den Widerstand verändert. Als Belastungsphasen werden die Zellen beispielsweise bei einer definierten Temperatur und eingestelltem Ladezustand für eine gewisse Zeit eingelagert (kalendarische Alterung) oder stetigen Lade- und Entladezyklen mit definierten Stromraten (oder Leistungen), Entladetiefen und Umgebungstemperaturen für eine gewisse Anzahl an Zyklen (zyklische Alterung) unterworfen. So kann festgestellt werden, wie sich diese spezielle Nutzung auf den Alterungszustand auswirkt. Darüber hinaus werden auch anwendungsnahe Belastungen mit dynamischen Stromprofilen (vgl. Abbildung 3) durchgeführt. Die gemessenen Daten werden ausgewertet, um die ermittelten Werte der aktuellen, maximalen Kapazität, des Innenwiderstands und SOC ergänzt und dem gesamten Projektkonsortium zugänglich gemacht. Zusätzlich wurde eine aktuelle Methode [3] zur Bestimmung der Alterungsmodi (Quantifizierung des Verlustes von Elektrodenkapazität an der Anode und Kathode sowie des Rückgangs des zyklisierbaren Lithiums) etabliert.

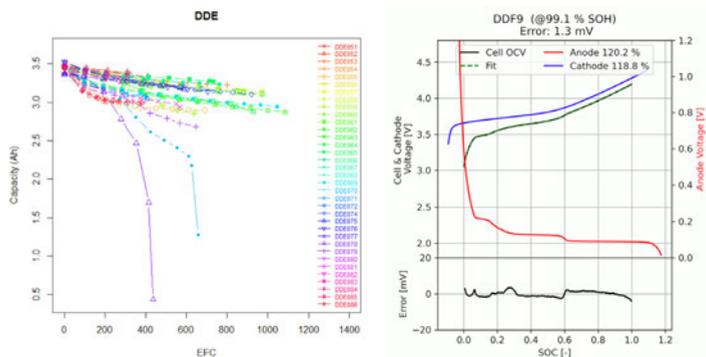


Abb. 4: Links: Abnahme der maximalen nutzbaren Speicherkapazität in Amperestunden der Vergleichbarkeit halber dargestellt über äquivalente Volllzyklen (engl.: equivalent full cycles, kurz: EFC) für eine Vielzahl unterschiedlich farblich dargestellter Batteriezellen [4]. Die verschiedenen Batteriezellen wurden zwischen den Check-up-Messungen unterschiedlich betrieben.

Rechts: Ermittlung der Alterungsmodi durch die Annäherung der Leerlaufspannung (in jeder Check-up-Messung ermittelt) mittels den Elektrodenpotentialen der in der Zelle verwendeten Kathoden- und Anoden-Kennlinien nach Birkel et al. [3].

Zur Schätzung des Alterungszustands aus Zeitreihendaten werden im Projekt verschiedene Methoden untersucht. Hier sind Deep Learning aus dem Bereich des maschinellen Lernens, iterative Schätzungsmethoden (Erweiterungen des Kalman-Filters), Ersatzschaltbildannäherung und andere mathematische Methoden zu nennen. Die Qualität und Vollständigkeit der Feld- aber auch der Labordaten sind für viele Ansätze wichtig und eine Vorbereitung der Daten teils sehr aufwendig, allerdings unablässig.

Die Arbeiten an den verschiedenen Zustandsbestimmern laufen noch bis Projektende. Einige frühe und aktuelle Ergebnisse wurden jedoch bereits in wissenschaftlichen Journalen publiziert bzw. eingereicht oder auf Konferenzen präsentiert. So zeigt beispielsweise Vanem et al. in [4], dass sogenannte Schnapschuss-Methoden, also Verfahren, die sich nur auf einen kurzen zeitlichen Auszug stützen, sehr geeignet für lückenhafte Betriebsdaten sind (speziell gegenüber kontinuierlichen Methoden wie lineare Schadensakkumulation). Teilweise sind die Vorhersagen sehr genau, wobei hier eine starke Abhängigkeit davon besteht, welche Daten in den Trainingssatz geflossen sind bzw. Trainingsdaten verwendet wurden, die den zu analysierenden Daten ähneln (oder entsprechen). Dies verdeutlicht die Notwendigkeit relevanter Trainingsdaten beim Einsatz von KI-Algorithmen.

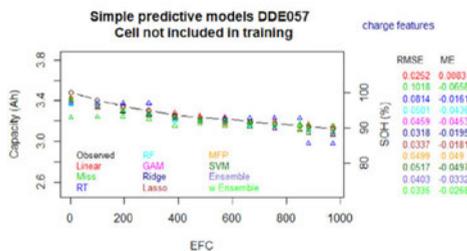


Abb. 5: Beispielhafter Auszug aus [4], der die Genauigkeit der Alterungsbestimmung verschiedener KI-Methoden für eine ausgewählte Laborzelle zeigt.

4. HYBRIDISIERUNG VON SCHIFFSANTRIEBEN: SIMULATIONSSTUDIE

Moderne Kreuzfahrtunternehmen verfügen über umfassende Betriebsdaten, die systematisch erfasst und idealerweise automatisiert für Analysen genutzt werden sollten. Simulationen erweitern die Einsatzmöglichkeiten dieser Daten, indem sie nicht gemessene Informationen mithilfe von Energiebilanzmodellen bereitstellen und What-If-Szenarien unter Verwendung aktueller Modelle ermöglichen. Die Aktualisierung dieser Modelle stellt zwar eine Herausforderung dar, kann jedoch durch schiffsspezifische Daten und Methoden wie Machine Learning (ML) bewältigt werden. Angesichts des wachsenden Umweltbewusstseins in der Schifffahrtsbranche bieten simulierte Systeme außerdem realistische Verbrauchsdaten zur Bewertung der Umweltauswirkungen.

Im letzten Jahr wurde das bislang größte Batteriespeichersystem in der Passagierschiffahrt auf dem Kreuzfahrtschiff AIDAprima mit einer Kapazität von 10 MWh installiert. Diese Installation zielt darauf ab, den Verbrauch von Schweröl und Marinem Gasöl zu

senken, null Emissionen bei der Hafenanfahrt zu gewährleisten und die Batterien mit umweltfreundlichen Landstrom für die Hafenabfahrt zu laden. Gleichzeitig werden Herausforderungen wie der erhöhte Materialbedarf und Umweltauswirkungen des Rohstoffabbaus beachtet. In diesem Teil der Forschung wird eine objektive Analyse des Umweltvorteils der Installation durchgeführt, einschließlich Emissionseinsparungen, Rohstoffwiederverwertung und ökologische Auswirkungen des Rohstoffabbaus.

Zur Quantifizierung der Reduzierung von Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen wird eine Verbrauchssimulation basierend auf Schiffsbetriebsdaten, Informationen über gebunkerte Kraftstoffe, den Gebrauch von Abgaswäschern & Abgasreinigungsanlagen und Motorkennfelder verwendet. Diese Simulation bildet die Grundlage für das Life Cycle Assessment und ermöglicht eine Bewertung des Nutzens des Batteriesystems in Bezug auf Luftemissionen.

Simulationen spielen auch bei den Bemühungen zur Steigerung der Energieeffizienz und Nachhaltigkeit eine wichtige Rolle. Daher besteht das übergeordnete Ziel darin, eine vielseitige Modellbibliothek und Simulationsplattform zu etablieren. Diese ermöglicht nicht nur die Bewertung der technischen Leistung, sondern auch die Berechnung der umweltspezifischen Nachhaltigkeitsauswirkungen. Um Möglichkeiten und Randbedingungen für die Betriebsunterstützung und -optimierung zu identifizieren, wurden umfassende systemweite Energiemodelle entwickelt, die dynamische Simulationen verschiedener Routen und Zeitpläne ermöglichen.

Der Schwerpunkt liegt auf einer spezifischen Fallstudie, bei der ein Schiff mit einem 10 MWh Batteriespeichersystem nachgerüstet wird. Diese Fallstudie wird eine Vergleichsanalyse zwischen dem Referenzschiff (Baseline; ohne Batteriesystem) und mit batterieunterstütztem Antrieb liefern. Die Messungen an Bord des Referenzschiffs dienen als Validierungsdaten für die Modelle. Es wurden verschiedene Szenarien unter Berücksichtigung unterschiedlicher Lade- und Entladezyklen für den Batteriebetrieb vorbereitet und simuliert. Das optimale Szenario wird in einer Vergleichsstudie verwendet, um das Verständnis für den Mehrwert des batterieunterstützten Schiffsbetriebs zu vertiefen.

Die wesentlichen Ziele der Simulationsmodelle sind:

- › Planung und Entwicklung der Modellbibliothek im Rahmen der Fallstudie,
- › Anwendung der Modellbibliothek, um das Referenzschiff sowohl als Basisschiff als auch als batterieunterstütztes Schiff zu simulieren,
- › Simulation verschiedener Szenarien für den batterieunterstützten Schiffsbetrieb, einschließlich Spinning Reserve, Peak Shaving und emissionsfreiem Betrieb,
- › Vergleich zwischen dem Basisschiff und dem batterieunterstützten Schiff, um die Vorteile hervorzuheben und potenzielle Herausforderungen zu identifizieren.

Die Modellentwicklung erfolgt durch die Nutzung eines leistungsstarken Prozesssimulators mit umfangreichen Bibliotheken zur Modellierung verschiedener Prozesse und Automatisierung. Apros wurde als das Systemsimulationstool ausgewählt, wobei die Vorbereitung und Verfeinerung von Simulationsdaten auch mit anderen Softwarelösungen wie Excel und Python durchgeführt werden können.

Die Simulation umfasst den Betrieb des Schiffes über einen bestimmten Zeitraum, daher ist es entscheidend, sowohl kurzfristige Ereignisse (z. B. Batterie-Transienten) als auch langfristige Faktoren (z. B. Verschmutzung des Schiffsrumpfes, die den Energiebedarf für den Antrieb beeinflusst) bei der Gestaltung der Modellbibliothek und der Planung von Simulationsexperimenten zu berücksichtigen.

Erste Ergebnisse der Simulationen umfassen:

- › Eine Modellbibliothek mit standardisierten Merkmalen im Rahmen der Fallstudie sowie erste Modellierungsrichtlinien für zukünftige Entwicklungen,
- › Basismodelle von Schiffen und ihren Vergleich mit Messdaten,
- › Modelle von batterieunterstützten Schiffen und Ergebnisse aus verschiedenen Betriebs-szenarien,
- › Eine vergleichende Analyse zwischen batterieunterstütztem Schiffsbetrieb und Basis-schiffsbetrieb.

Die vorläufigen Ergebnisse des Projekts bestätigen die Vorteile der Nutzung von dynamischen Simulationen zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Verbesserung der Machbarkeitsstudien. Die laufenden Entwicklungsarbeiten werden das Modell durch die Integration zusätzlicher Komponenten erweitern und die Modellbibliothek für Schiffe ausbauen.

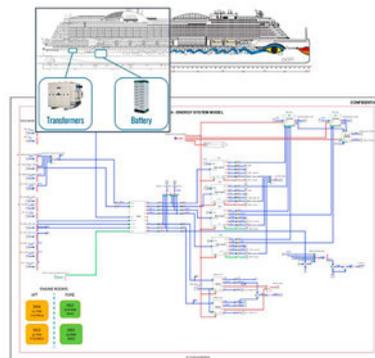


Abb. 6: Simulationsmodell des hybriden Schiffsantriebs.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das elektrische und thermische Verhalten von Batterien kann durch Ersatzschaltbildmodelle mit hoher Genauigkeit beschrieben werden. Die Ermittlung des Alterungsverhalten ist äußerst komplex und macht neben der Sammlung von Felddaten auch Messungen der Zellalterung im Labor notwendig. Diese können detailliert ausgewertet werden, um zu bestimmen, durch welche grundlegenden Veränderungen in der Zelle, sie sich auf welche Weise verschlechtert und wie diese Alterung mit den Testparametern korreliert. Dies erlaubt es auch für die Alterung ein empirisches Modell zu erstellen.

Da das vorgestellte Simulationsmodell eine hohe Übereinstimmung zu Validierungsmessungen zeigt, kann es dafür eingesetzt werden, synthetische Daten zu erzeugen, die wiederum zum Training von Algorithmen zur Zustandsbestimmung eingesetzt werden können. Hier wurde gezeigt, dass es generell möglich ist, auch aus unvollständigen Feld- oder Labordaten zutreffende Schätzungen zu ermitteln. Allerdings ist eine Abhängigkeit der Aussagekraft von den Trainingsdaten festzustellen. Hier ist es wahrscheinlich, dass in den nächsten Schritten die synthetischen Daten zu einer Verbesserung führen werden.

Das Simulationsmodell kann darüber hinaus auch zur Bestimmung des ökonomischen und ökologischen Nutzens der Hybridisierung von Schiffen durch Kraftstoffeinsparung liefern. Zudem ist es ein wichtiges Planungswerkzeug, um beispielsweise die Reichweite von rein batterieelektrischen Manövern vorauszusagen oder neue Antriebssysteme zu planen.

Die langsam ablaufenden Alterungstests müssen noch weitergeführt werden und die Alterungsmodellierung muss abgeschlossen und in das Batteriemodell eingebettet werden. Die Validierung des finalen Modells mit den im Feld gesammelten Daten und die Simulationsstudie auf Schiffs-Ebene steht zum Zeitpunkt des Verfassens dieses Artikels ebenfalls noch aus.

LITERATUR

- [1] Maximilian Bruch, Lluís Millet, Julia Kowal, und Matthias Vetter, „Novel method for the parameterization of a reliable equivalent circuit model for the precise simulation of a battery cell's electric behavior“, *Journal of Power Sources*, Bd. 490, S. 229513, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.jpowsour.2021.229513.
- [2] D. Bernardi, E. Pawlikowski, und J. Newman, „A General Energy Balance for Battery Systems“, *J. Electrochem. Soc.*, Bd. 132, Nr. 1, S. 5, Jan. 1985, doi: 10.1149/1.2113792.
- [3] C. R. Birkel, M. R. Roberts, E. McTurk, P. G. Bruce, und D. A. Howey, „Degradation diagnostics for lithium ion cells“, *Journal of Power Sources*, Bd. 341, S. 373–386, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.12.011.
- [4] E. Vanem, M. Bruch, Q. Liang, K. Thorbjørnsen, L. O. Valøen, und Ø. Å. Alnes, „Data-driven snapshot methods leveraging data fusion to estimate state of health for maritime battery systems“, *Energy Storage*, Bd. n/a, Nr. n/a, S. e476, doi: 10.1002/est2.476.

AMMONIAMOT

REGENERATIV ERZEUGTES AMMONIAK ALS KRAFTSTOFF DER ZUKUNFT FÜR
MARINE-VERBRENNUNGSMOTOREN IN EINER DEKARBONISIERTEN WELT

AUTOREN

KARSTEN STENZEL	WTZ ROSSLAU GGMBH
PHILLIP THORAU	WTZ ROSSLAU GGMBH
VALENTIN SCHARL	TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
DOMINIK KRNAC	MAN ENERGY SOLUTIONS SE
SEBASTIAN RÖSLER	MAN ENERGY SOLUTIONS SE
HARALD ARNDT	NEPTUN SHIP DESIGN GMBH

1. EINLEITUNG

Die Internationale Seeschiffahrts-Organisation hat im Jahr 2018 mit der Einführung einer ersten Strategie zur Senkung der Treibhausgasemissionen von Schiffen einen wichtigen Grundstein für die Umsetzung des Pariser Klimaabkommens gelegt, um die globale Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen. Im Juli 2023 beschloss die IMO eine Verschärfung der eigenen Ziele, sodass die internationale Seeschiffahrt bis etwa 2050 klimaneutral werden soll. Diese Ziele können bei maritimen Antrieben nur durch den Einsatz von erneuerbaren, kohlenstofffreien Kraftstoffen erreicht werden. Ammoniak bietet in diesem Zusammenhang die Möglichkeit den maritimen Sektor zu dekarbonisieren und ist zugleich eine kostengünstige Alternative, um Wasserstoff in großen Mengen und über weite Strecken zu transportieren. Aufgrund der herausfordernden Brenneigenschaften sowie den zu erwartenden Stickoxid- und Ammoniak-Emissionen sind umfangreiche Untersuchungen erforderlich, um eine robuste und klimafreundliche Technologie für den Antrieb von Schiffen mit Ammoniak zu entwickeln.

Im Projektverbund AmmoniaMot werden diese Themen eingehend beleuchtet, um ganzheitliche Lösungen für die Einführung von Ammoniak als Schiffskraftstoff zu erarbeiten. Die Technische Universität München (TUM) führt grundlegende Verbrennungsuntersuchung zu dieselgezündeten Ammoniakstrahlen an einem Einhubtriebwerk durch. Die Erkenntnisse dienen dem Aufbau von Simulationsmodellen und sollen bei der Konfiguration der Einspritzdüsen von Woodward L'Orange sowie bei den Einzylinder-Untersuchungen im WTZ Roßlau unterstützen. Letztere haben zum Ziel, das Brennverfahren hinsichtlich Motorperformance und Abgasemissionen zu optimieren und in diesem Zusammenhang die maximalen Ammoniakanteile zu erhöhen. Die erforderliche Ammoniak-Peripherie entstand in Kooperation mit Neptun Ship Design, wo parallel ein modularisiertes, gekapseltes und damit eigensicheres Kraftstoffsystem für den Einsatz an Bord von Schiffen entwickelt wurde. MAN Energy Solutions unterstützt das Projekt mit Motor-

komponenten und wird die Ergebnisse vom Einzylinder-Forschungsmotor skalieren und auf einen großen mittelschnelllaufenden Viertaktmotor übertragen. Dadurch stehen zeitnah Lösungen für die Reduktion der maritimen Triebhausgasemissionen und für den Klimaschutz zur Verfügung

2 AMMONIAKVERBRENNUNG

In der jüngeren Vergangenheit hat Ammoniak mit Blick auf den Umweltschutz erneut an Bedeutung gewonnen. Als kohlenstofffreier Energieträger lässt sich Ammoniak aus weltweit frei verfügbarem Stickstoff und Wasser mithilfe der Elektrolyse und Haber-Bosch-Synthese herstellen und kann beim Einsatz regenerativer Energiequellen als grüner Energieträger klassifizieren werden. Mit einem unteren Heizwert von 12,7 MJ/l liegt die Energiedichte etwas unter dem Niveau von Methanol und über der von komprimierten bzw. verflüssigtem Wasserstoff. Gleichzeitig ist Ammoniak bei -33 °C unter Umgebungsbedingungen bzw. bei 20 °C und 8 bar flüssig, sodass eine Speicherung mit deutlich geringerem Aufwand im Vergleich zum Wasserstoff möglich ist. Aufgrund dieser Vorteile wird Ammoniak als bedeutender globaler Energievektor gehandelt. Rund 80 % der Weltjahresproduktion von 125 Millionen Tonnen entfallen aktuell für die Düngemittelproduktion [1]. Dadurch existiert bereits eine verlässliche Ammoniakinfrastruktur für die Speicherung und den Transport großer Mengen, die eine Technologieeinführung insbesondere für maritime Anwendungen begünstigt.

In der Abbildung 1 sind unterschiedliche Ammoniak-Brennverfahren dargestellt, die hinsichtlich Kraftstoffeinspritzung und Zündkonzept klassifiziert sind. Dabei kommen für die Ammoniakverbrennung sowohl die Zündung mit einer Zündkerze sowie mit einem Pilotkraftstoff als auch prinzipiell die Selbstzündung infrage. Im Forschungsprojekt Ammonia-Mot wird sowohl das Ammoniak als auch der Dieselmotorkraftstoff mit hohem Druck direkt in den Brennraum eingebracht und diffusiv verbrannt. Dafür stehen HPDF-Injektoren vom Verbundpartner Woodward L'Orange zur Verfügung (siehe Abbildung 2). Die Dieseleinspritzung erfolgt dabei über eine zentrale, elektrisch gesteuerte Düsennadel und mit einem Einspritzdruck von bis zu 2200 bar. Das Ammoniak wird über 3 außenliegende Düsen eingebracht, wobei die Ansteuerung hydraulisch erfolgt und Einspritzdrücke von bis zu 500 bar möglich sind. Vorteilhaft ist bei diesem Dual-Fuel-Brennverfahren, dass ein vollständiges Diesel-Backup zur Verfügung steht. Zudem wird erwartet, dass durch die diffusive Verbrennung der NH₃-Schlupf gegenüber den vorgemischten Verfahren deutlich reduziert werden kann.

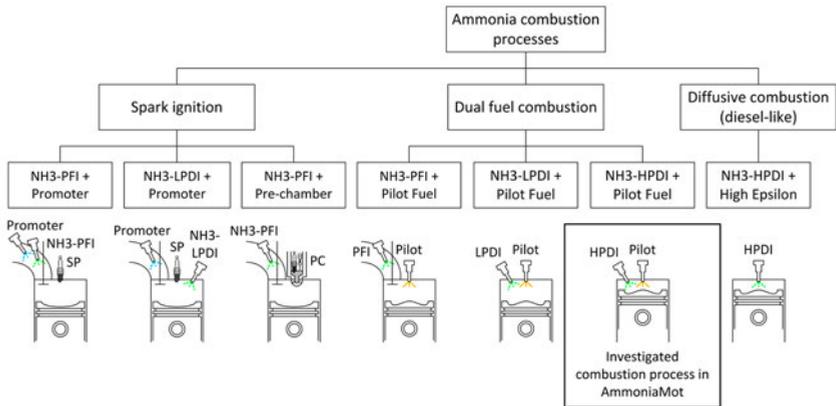


Abb. 1: Untersuchtes Brennverfahren im aktuellen Projekt. Quelle: Stenzel et al., 2022 [7]



Abb. 2: Eingesetzter HPDI-Injektor des Verbundpartners Woodward L'Orange. Quelle: Stenzel et al., 2022 [7]

3. EINHUBMASCHINE UND SIMULATION DER AMMONIAK-DIESEL DUAL-FUEL VERBRENNUNG

Am Lehrstuhl für Thermodynamik der TUM wurden an einer Einhubmaschine grundlegende Untersuchungen zum Zünd- und Verbrennungsverhalten von diesel-pilotierten Ammoniaksprays durchgeführt. Abbildung 3 zeigt einen schematischen Überblick der Einhubmaschine. Im Gegensatz zum realen Motor wird die Einhubmaschine durch Druckluft aus mehreren Gasflaschen (1) angetrieben, wobei der Quarzglas Kolben (5) durch einen hydraulisch gekoppelten Kolben beschleunigt wird. Die Kolbenbewegung in der Nähe des oberen Totpunkts folgt einer Kurve, die der eines Motors bei 800-1000 U/min ähnelt. Dabei sind Spitzendrücke und -temperaturen von bis zu 125 bar und 920 K bar im oberen Totpunkt erreichbar.

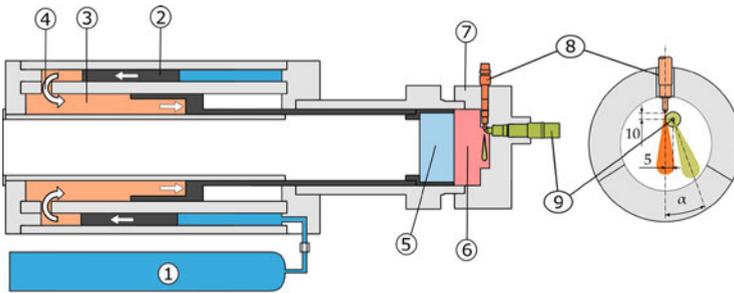


Abb. 3: Schematischer Überblick zur Einhubmaschine und dem Injektoraufbau. Quelle: Scharl et al., 2022 [2]

Zwei Injektoren, einer für Diesel und einer für NH₃, sind im Zylinderkopf montiert. Beide Einspritzdüsen haben eine einzige Düsenbohrung und arbeiten mit hohen Kraftstoffdrücken von bis zu 2000 bar für Diesel und bis zu 530 bar für NH₃. In Abbildung 3 (rechts) ist die Anordnung der Einspritzdüsen dargestellt. Durch Rotation des Ammoniakinjektors kann die räumliche Strahlinteraktion eingestellt werden. Der Glaseinsatz im Kolben ermöglicht einen optischen Zugang.

Durch systematische Variation der zeitlichen und räumlichen Interaktion zwischen Ammoniak- und Dieselstrahlen konnten Auslegungskriterien für das Spritzbild des späteren Vollinjektors ermittelt werden [2]. Die optischen Untersuchungen trugen zum Verständnis des Verhaltens von Ammoniak als Kraftstoff bei. So konnte gezeigt werden, dass die Mechanismen zur Flammenstabilisierung konventioneller Dieseldieselkraftstoffe nicht auf Ammoniak übertragbar sind [3]. Des Weiteren wurden große Abhebelängen der Ammoniakflammen als Ursache für unverbrannte Ammoniakemissionen identifiziert. Die Ammoniak-Emissionen konnten durch kleine Nacheinspritzungen mit Diesel, die die Abhebelänge reduzieren, deutlich gemindert werden [4]. Zur Validierung der simulierten Sprays wurden Aufnahmen von inerten Sprays mittels der Schattenmesstechnik aufgenommen. Aus diesen konnten Dampfpenetration und Spraywinkel extrahiert werden. Unter reaktiven Bedingungen wurden Schatten- und OH*-Chemilumineszenz Aufnahmen simultan durchgeführt, um Gemischaufbereitung und Verbrennung validieren zu können.

Alle Spray- und Verbrennungssimulationen werden mit STAR-CCM+ [5] durchgeführt. Das Netz wird mit derselben Software erstellt, wobei eine etwas größere Gesamtzellengröße mit einer zweistufigen Netzverfeinerung für die Pilotdiesel- und Ammoniaksprays verwendet wird. Die Basiszellengröße wird auf 3 mm festgelegt, und innerhalb der Verfeinerungszonen werden wesentlich kleinere Zellengrößen von 0,75 mm und 0,375 mm verwendet. Abbildung 4 zeigt die Geometrie der Einhubmaschine auf der linken Seite, einschließlich des äußeren Oberflächennetzes. Auf der rechten Seite ist ein Schnitt durch die Injektorebene zu sehen, der die Netzverfeinerungen für die Sprays zeigt. Die roten Linien zeigen die Einspritzrichtungen für Ammoniak (oben) und Diesel (unten) bei paralleler Ausrichtung der Kraftstoffsprays. Für nicht-parallele Sprays ist der Verfeinerungs-

bereich des NH₃-Sprays gedreht, um sicherzustellen, dass das gesamte Spray von der Netzverfeinerung erfasst wird.

Eine umfassende Beschreibung der Spray- und Verbrennungsmodellierung wurde in [6] durch Krnac et al. beschrieben. Dabei konnte für die Simulation der Diesel- und Ammoniakstrahlen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen an der Einhubmaschine erzielt werden (siehe Abbildung 5). Beim betrachteten Betriebspunkt für die Verbrennungssimulation werden Diesel und Ammoniak 2 ms bzw. 1,5 ms vor dem oberen Totpunkt eingespritzt, wobei die eingebrachten Massen 5 mg bzw. 210 mg betragen. Der gewählte Aufbau weist leicht konvergierende Sprays mit einem Interaktionswinkel von $-7,5^\circ$ auf. Diese Bedingungen führten zu einer zuverlässigen Zündung und einem hohen Ausbrand von NH₃ während der experimentellen Untersuchungen [2].



Abb. 4: Oberflächennetz der Einhubmaschine (links) und zweistufige Verfeinerung des Spraybereichs (rechts). Quelle: Krnac et al., 2023 [6]

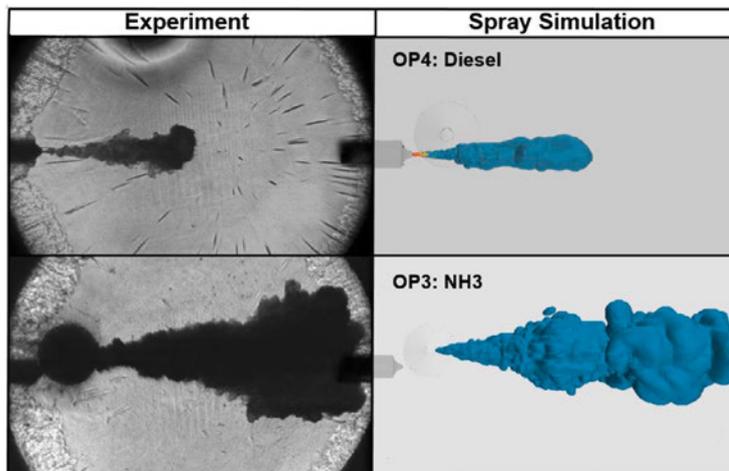


Abb. 5: Beispielhafte Shadowgraphy-Bilder (links) und entsprechende Simulationsergebnisse (rechts), obere Reihe: Einspritzung von Diesel in Betriebspunkt 4, untere Reihe: Einspritzung von NH₃ in Betriebspunkt 3. Quelle: Krnac et al., 2023 [6]

In Abbildung 6 wird die aus den Verbrennungssimulationen ermittelte Gastemperatur während der Piloteinspritzung und der Hauptbrennstoffverbrennung bei verschiedenen Kurbelwinkeln mit den kombinierten Shadowgraphy- und OH*-Chemilumineszenz-Bildern aus den Experimenten verglichen. Aufgrund der extremen physikalischen Stoffwerte von Ammoniak findet keine Flammenstabilisierung, wie mit Dieselmotoren, statt [3]. Die Ammoniakflamme bleibt also nicht in der Nähe der Einspritzdüse verankert, sondern wird langsam von der Einspritzdüse weg in Richtung Zylinderwand geblasen. Das verbleibende unverbrannte Ammoniak brennt langsam in der Nähe der Zylinderwand weiter.

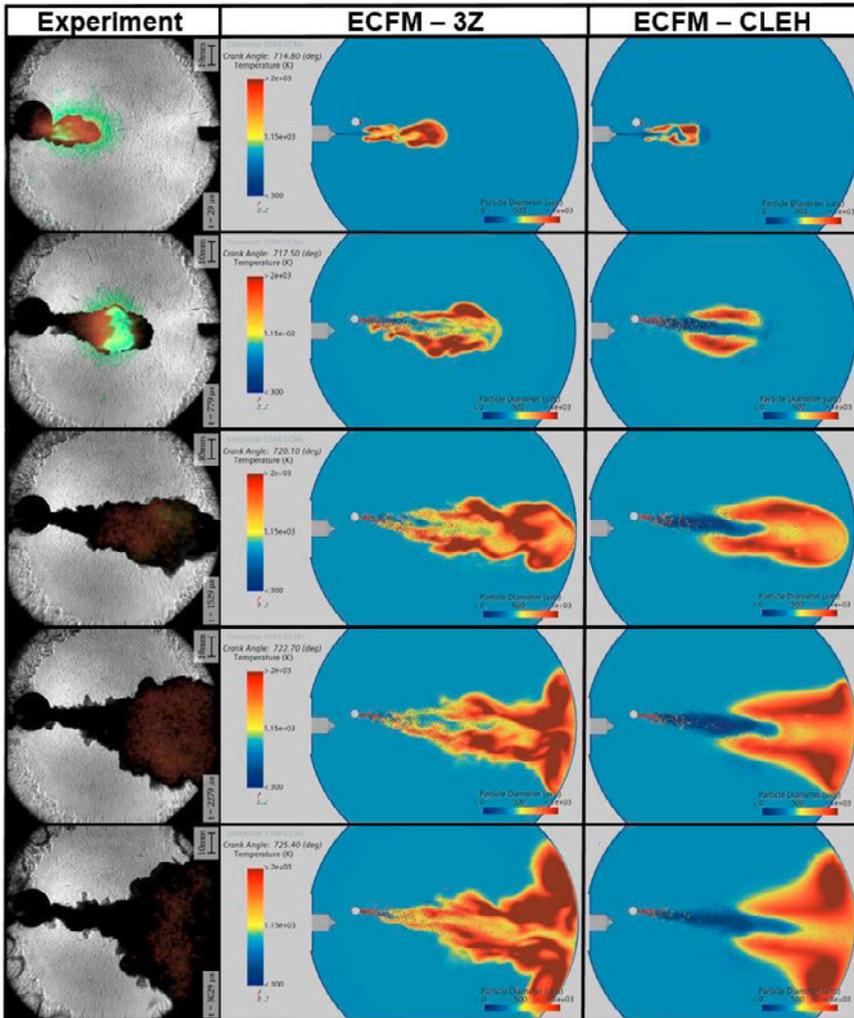


Abb. 6: Vergleich der optischen Untersuchungen (Shadowgraphy + OH*-Chemilumineszenz) (links), Simulationsergebnisse mit dem ECFM-3Z-Modell (Mitte) und dem ECFM-CLEH-Modell (rechts) zu gleichen Zeitpunkten. Quelle: Krnac et al., 2023 [6]

Für die CFD-Verbrennungssimulationen wurden mit dem ECFM-3Z und dem ECFM-CLEH Modell zwei unterschiedliche, auf tabellierter Chemie basierende, Verbrennungsmodelle verwendet. Insgesamt weicht das vom ECFM-3Z-Modell vorhergesagte Verbrennungsverhalten deutlich von der experimentellen Beobachtung ab. Das ECFM-3Z-Modell sagt eine schnellere Verbrennung von Ammoniak voraus, und die Flamme ist in der Nähe des Injektors lokalisiert, was auf eine schnellere Reaktion des Ammoniaks hinweist. Im Gegensatz zum ECFM-3Z-Modell sagt das ECFM-CLEH-Modell den Beginn der Ammoniakverbrennung weiter entfernt von der Einspritzdüse voraus. Auch das oben beschriebene langsame Abblasen der Flamme in Richtung Zylinderwand wird durch das ECFM-CLEH Modell korrekt abgebildet. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass das ECFM-CLEH Modell in der Lage ist, eine verzögerte Ammoniakverbrennung genauer vorherzusagen als das ECFM-3Z Modell. Der Hauptunterschied im Verbrennungsmodellierungsansatz von ECFM-CLEH ist der zusätzliche diffusive Verbrennungsmodus, der vom Post-Oxidationsmodus (PSTOX) getrennt ist, sowie die Begrenzung der Verbrennung durch das Enthalpiegleichgewicht, wodurch eine langsamere und realistischere Verbrennung gewährleistet wird.

4. EINZYLINDER-FORSCHUNGSMOTOR UND THERMODYNAMISCHE UNTERSUCHUNG DES AMMONIAK-BRENNVERFAHRENS

Die motorischen Untersuchungen fanden am Einzylinder-Forschungsmotor FM18 im WTZ Roßlau statt. Der Motor und die wichtigsten Randbedingungen sind in der Abbildung 7 dargestellt.

Einzylinder-Forschungsmotor FM18		
Parameter	Einheit	Wert
Hub	mm	175
Bohrung	mm	215
Zylinderanzahl	-	1
Hubvolumen	dm ³	5.17
Pleuellänge	mm	547
Nennleistung	kW	180
Nenndrehzahl	min ⁻¹	1800
Ventilanzahl	-	4
Verdichtung	-	19.2:1 (variabel)
Nockenwelle	-	axial verspannt (variabel)



Abb. 7: Einzylinder-Forschungsmotor FM18. Quelle: Stenzel et al., 2022 [7]

Ausgelegt ist der Grundmotor für Spitzendrücke von bis zu 400 bar und zeichnet sich zudem durch eine hohe Flexibilität beim Verdichtungsverhältnis und den Ventilsteuerzeiten aus. Für die Grundvermessung und die Ammoniakuntersuchungen wurde der

Motor mit Triebwerkskomponenten vom Projektpartner MAN Energy Solutions ausgestattet. In Vorbereitung zu den Brennverfahrensuntersuchungen wurde durch das WTZ Roßlau und Neptun Ship Design eine umfangreiche Ammoniak-Peripherie aufgebaut (siehe Abbildung 8). Diese wurde eingehend in der Veröffentlichung von Stenzel et al. [7] beschrieben und ermöglicht es Ammoniak mit einem Druck von 500 bar für die motorischen Untersuchungen bereitzustellen.

Die Optimierung des Brennverfahrens fokussiert sich insbesondere auf die Motoreffizienz, die erreichbaren Ammoniakanteile, die Verbrennungsstabilität und die Abgasemissionen. Zu diesem Zweck ist am Einzylinder-Forschungsmotor umfangreiche Indiziermesstechnik im Ladeluft-, Abgas-, Diesel- und Ammoniak-System sowie im Brennraum verbaut. Darüber hinaus werden die Abgasemissionen mit einem FTIR-Spektrometer vom Typ AVL SESAM i60 FT gemessen. Dadurch ist es möglich neben dem Ausstoß von Stickoxiden auch den Ammoniak-Schlupf zu bewerten. Der Vermeidung von Lachgas-Emissionen kommt dabei, aufgrund des hohen Treibhauspotenzials von 310 bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren, besondere Bedeutung zu.

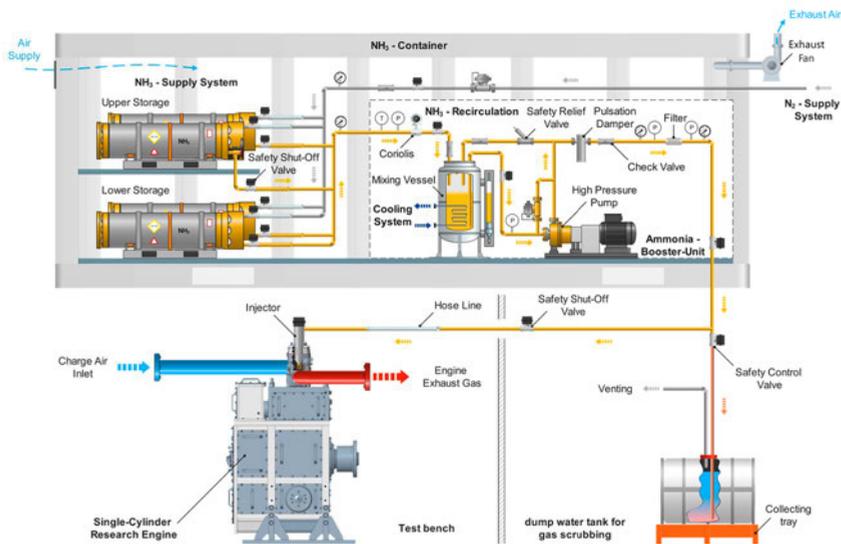


Abb. 8: Ammoniak-Infrastruktur im WTZ Roßlau. Quelle: Stenzel et al., 2022 [7]

Im Rahmen der motorischen Untersuchungen wurde besonderes Augenmerk auf die charakteristischen Merkmale der Verbrennung sowie das Emissionsverhalten gelegt. Dazu wurden weitreichende Versuche durchgeführt und durch Thorau et al. [8] veröffentlicht. Repräsentativ für die umfassende Parameterstudie wird nachfolgend auf den Einfluss der Motordrehzahl auf das Brennverhalten von Ammoniak eingegangen. Die entsprechenden Betriebsparameter sind in der Tabelle 1 aufgeführt. Dabei wurden der indizierte Mitteldruck (p_{mi}), die Ladeluftmasse (m_{LU}), der Umsatzschwerpunkt (α_{50}) sowie zwei unter-

schiedliche Einspritzzeitpunktdifferenzen (SOE_{DIFF}) über der Drehzahl (n_{MOT}) konstant gehalten. Begrenzend war hierbei das FTIR-Messgerät, bei dem die maximal messbare Ammoniakkonzentration im Abgas 3000 ppm beträgt.

Tabelle 1: Messprogramm zum Einfluss der Drehzahl

Betriebspunkt		Variationsbereich	Grenzen
pmi	12 bar		
m_{LL}	12 g/ASP		
SOE_{DIFF}	925 μs 2775 μs	$n_{MOT} = 600 \dots 1800 \text{ min}^{-1}$ $\Delta n_{MOT} = 300 \text{ min}^{-1}$	$NH_3 = 3000 \text{ ppm}$
α_{50}	10 °KW n. ZOT		
xq_{NH_3}	Max. %		

In der Abbildung 9 ist zu erkennen, dass bei einem max. Ammoniakschluss von 3000 ppm die zumischbaren Ammoniakanteile bei kleineren Einspritzdifferenzen deutlich höher liegen. Des Weiteren ist ein Ansteigen des möglichen Ammoniakanteils bei geringen Drehzahlen zu beobachten, was auf die geringe laminare Flammgeschwindigkeit des Ammoniaks und den vollständigeren Umsatz zurückzuführen ist. Zudem ist bei höheren Drehzahlen eine winkelbasierte Verlängerung der Brenndauer zu erkennen, die aufgrund einer zeitlich schnelleren Abkühlung der Brennraumtemperatur zu einer Reduktion der Ammoniakumsätze führt.

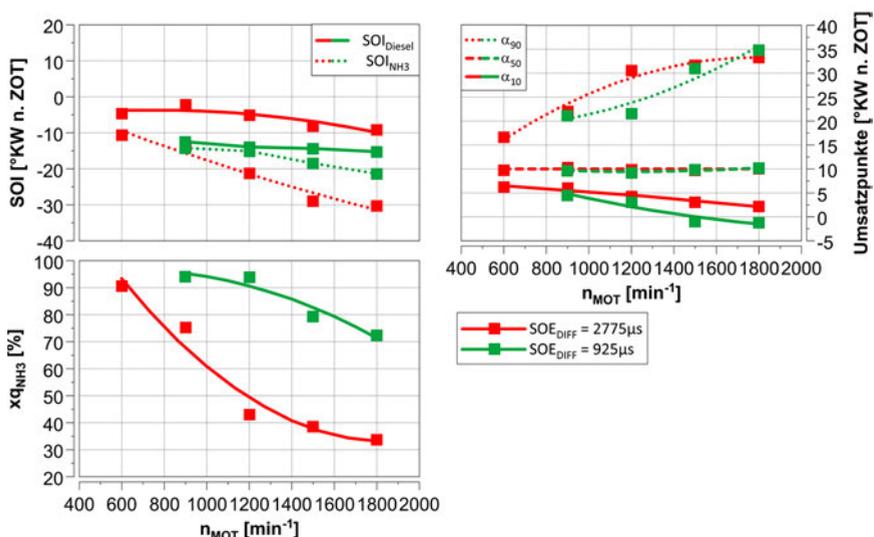


Abb. 9: Einfluss der Drehzahl auf die zumischbaren Ammoniakanteile (NH_3 , Schlupf = 3000 ppm).
Quelle: Thorau et al., 2023 [8]

In Abbildung 10 wird deutlich, dass höhere Ammoniakanteile zu einer proportionalen Erhöhung der Wasseremissionen führen. Weiterhin zeigen sich bei beiden Einspritz-

differenzen reduzierte Ammoniakemissionen bei minimaler Drehzahl, jedoch ist zu beachten, dass dieses Verhalten nicht stetig ist. Hinsichtlich des Entstehens von Kohlenstoffdioxid wird ein proportionales Verhalten zum energetischen Dieselanteil deutlich. Weiterhin zeigen sich erhöhte Lachgasemissionen bei einem SOE_{DIFF} von $2775 \mu s$. Dies lässt sich auf eine geringere Sprayinteraktion von Diesel und Ammoniak zurückführen, welche die Bildung unvollständiger Verbrennungsprodukte, wie Lachgas, begünstigt.

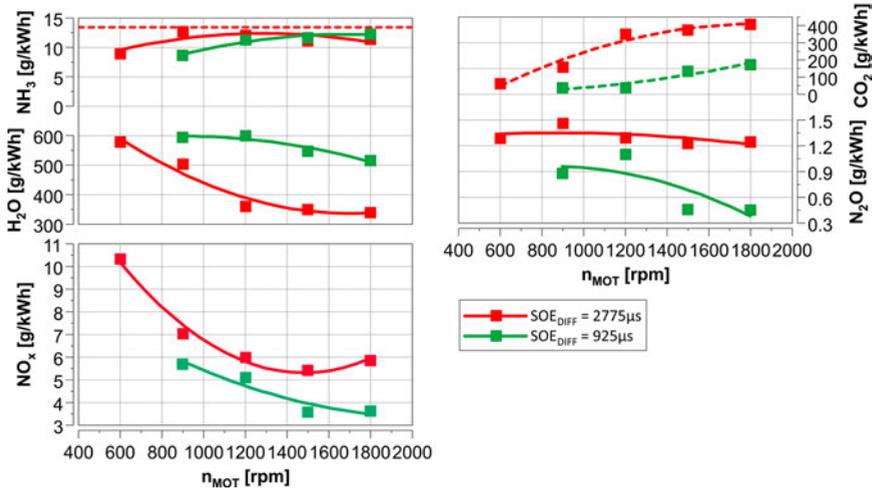


Abb. 10: Einfluss der Drehzahl auf das Emissionsverhalten bei max. Ammoniak-Anteil (NH_3 , Schlupf = 3000 ppm). Quelle: Thorau et al., 2023 [8]

5. GESAMTSYSTEM: TANK – AMMONIAK-MODUL – MOTOR

Beim Einsatz von grünem Ammoniak als zukünftigen Treibstoff in der Schifffahrt werden aktuell die Themen „Refit“ oder „Ammoniak ready“ vielfach diskutiert. Technisch ist eine Umrüstung aber nicht nur davon abhängig, ob ein Motor angepasst oder ausgetauscht werden kann, sondern entscheidende Designkriterien sind die Anpassungen oder Neuausstattungen der Tanksysteme eines Schiffes für Ammoniak als auch für die Bunkerlogistik. Dabei müssen zahlreiche Fragen beantwortet werden: Wird das Ammoniak gekühlt gelagert oder unter Druck? Wie wird das Ammoniak im Kraftstoffsystem flüssig gehalten? Welche sichere Prozesstechnik wird benötigt, um das Ammoniak bedarfsgerecht in Menge und Druck dem Motor zuzuführen? Wie entspanne ich das System, wenn der Motor gestoppt wird, und das ohne teures grünes Ammoniak in die Atmosphäre und die See abzuleiten? Welche Systeme zur Überwachung und zum Schutz der Technik, des Personals sowie der Umwelt sind notwendig und wie integriere ich diese in das Automationssystem des Schiffes? Welche Vorschriften gibt es zu diesen Fragestellungen, welche machen Sinn und welche gilt es mit den Klassifikationsgesellschaften entsprechend der technischen Möglichkeiten und den Ergebnissen aus den Risikoanalysen anzupassen? Letztendlich sind Kostenstrukturen zu erwarten, welche den Hochlauf einer NH_3 -Motorisierung erschweren, was allgemein auch für die anderen alternativen Kraftstoffe gilt.

Hierbei sei auch erwähnt, dass trotzdem als Backup und für den Pilotkraftstoff ein MDO-System an Bord eingerichtet werden muss.

Die Entwicklung eines NH₃-Kraftstoffsystems ist herausfordernd sowie komplex und es unterscheidet sich grundlegend von den traditionellen Kraftstoffsystemen für Marinediesel oder Schweröl. Die Neuartigkeit als auch das Fehlen von Referenzen und Verfügbarkeiten aus der maritimen Zulieferindustrie machen es aktuell den Werften so gut wie unmöglich technisch und kommerziell verlässliche Angebote für Ammoniak-Schiffe auszureichen. NSD sieht einen pragmatischen Ansatz und einen hohen Marktbedarf, das gesamte Kraftstoffsystem so zu modularisieren, dass das technische und kommerzielle Projektrisiko für jede Werft kalkulierbar wird.

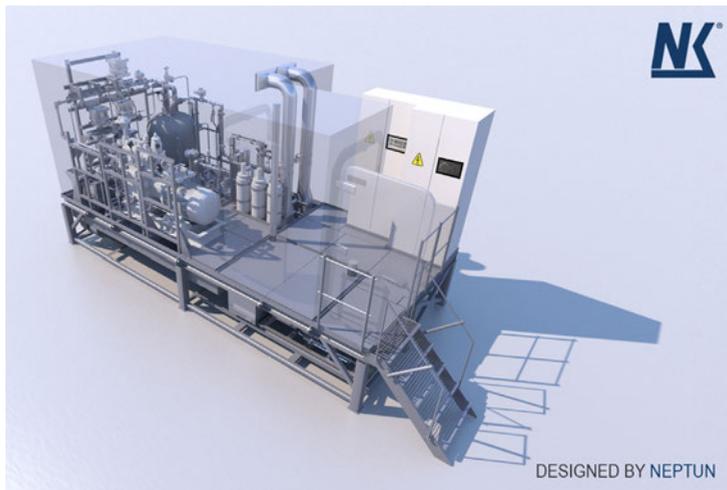


Abb. 11: CAPSAM-Modul

Neben dem NH₃-System sind alle notwendigen Subsysteme, wie die Automation und Sicherheitstechnik, Bestandteil des Modules. Das zertifizierte CAPSAM (Capsulated Ammonia Module, siehe Abbildung 11) kann in Zukunft von der Werft mit oder zum jeweiligen Motor bestellt werden. Es wird im Schiffsdesign über die Schnittstellen systemtechnisch und elektrisch integriert. Kosteneinsparungen im Werftdesign, beim Bau des Schiffes und bei der Inbetriebnahme sind garantiert. Der Reeder hat mit dem Modullieferanten einen zentralen Ansprechpartner, was Sicherheit bei Betriebsausfall, Wartung und Ersatzteilbeschaffung bedeutet.

NSD und die assoziierte Klassifikationsgesellschaft ABS haben das NH₃-Gesamtsystem vom Tank über das CAPSAM-Modul bis hin zum Motor einer umfangreichen HAZID-Bewertung unterzogen (siehe Abbildung 12). Das „Mitigated Risk Ranking“ weist keine hohen und extremen Risiken für den eigensicheren Betrieb und Wartung des Systems auf.

Node #	Key system level HAZID nodes	Unmitigated Risk Ranking				Mitigated Risk Ranking			
		L	M	H	E	L	M	H	E
1	General Arrangement (including CAPSAM space)	-	-	-	-	-	-	-	-
2	Ammonia Fuel Storage System Onboard	-	-	-	-	-	-	-	-
3	Ammonia Fuel Supply System/Piping (ship storage to CAPSAM module)	-	-	-	-	-	-	-	-
4	CAPSAM Module - Inlet to E01 Mixing Tank	5	17	17	0	31	8	-	-
5	CAPSAM Module - E01 Mixing Tank	0	5	-	0	2	3	-	-
6	CAPSAM Module - CAPSAM Module - Inlet to E01 Mixing Tank	4	34	16	0	24	30	-	-
7	Double Wall Piping from VH04 to Engine	0	7	26	1	22	12	-	-
8	System Output to Engine	-	-	-	-	-	-	-	-
9	Depressurizing System	3	23	5	0	11	20	-	-
10	CAPSAM Module - Ammonia Refrigeration System	2	1	0	0	2	1	-	-
11	CAPSAM Module - Ventilation System	-	-	-	-	-	-	-	-
12	CAPSAM Module - Venting System	-	-	-	-	-	-	-	-
13	CAPSAM Module - Inerting System	-	-	-	-	-	-	-	-
14	CAPSAM Module - Control/Automation System	-	-	-	-	-	-	-	-
15	CAPSAM Module - Safety Systems (ESD, Isolation, Pressure Relief, F&G Detection, CAPSAM Locking System)	-	-	-	-	-	-	-	-
16	CAPSAM Module - Firefighting Systems	-	1	-	-	-	1	-	-
17	CAPSAM Module - Structures	-	-	-	-	-	-	-	-
18	System Operating Modes	-	-	-	-	-	-	-	-
19	System Maintenance & Inspection	-	-	-	-	-	-	-	-
20	System Installation On Marine Vessels	-	-	-	-	-	-	-	-
Total		14	88	64	1	92	75	0	0

(1): L=Low, M= Medium, H = High and E = Extreme

Abb. 12: Notes und Risk Ranking aus dem ABS/NSD HAZID-Report

6. WIRTSCHAFTLICHE VERWERTUNG UND PRAKTISCHER EINSATZ DER ERGEBNISSE

Nach erfolgreichem Abschluss des Projektes AmmoniaMot wird NSD mit referenzstarken Partnern aus der maritimen Zulieferindustrie das skalierbare CAPSAM-Konzept in eine erste Demonstrator-Anwendungen überführen, um sicherzustellen, dass zukünftig dem Markt zusammen mit den NH₃-Motoren auch eine eigensichere Kraftstoffaufbereitung geliefert werden kann. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen es NSD zusammen mit den Klassen und der Zulieferindustrie den Schiffseignern effiziente aber vor allem sichere Schiffskonzepte, angetrieben durch NH₃-Motoren, anbieten zu können.

Die im Rahmen des Forschungsprojektes erzielten Erkenntnisse über das HPDI-NH₃ Brennverfahren legen seitens MAN den Grundstein für die Entwicklung NH₃-betriebener mittelschnelllaufender Verbrennungsmotoren als Nebenaggregatantrieb oder Fahrtrieb in Schiffen. Relevante Produktreihen werden in den kommenden Jahren für den CO₂-freien Kraftstoff bei MAN weiterentwickelt. Ein elementarer Baustein des HPDI-NH₃ Brennverfahrens bildet der 2-Stoff-Kraftstoffinjektor. Gemeinsam mit dem Projektpartner WLO sind innerhalb der Untersuchungen erste wegweisende Erkenntnisse hinsichtlich

zielführender Ausführungsart, auftretenden Herausforderungen v.a. hinsichtlich Zuverlässigkeit/Wiederholgenauigkeit eines solchen Injektors erzielt worden, welche in die anstehende Entwicklung, Optimierung und Serialisierung von NH₃-HPDI 2-Stoffinjektoren einfließen wird. Darüber hinaus dienen die Forschungsergebnisse als Absprungbasis und Referenz für Untersuchungen zum PFI und LPDI NH₃-Dualfuel-Ottobrennverfahren im Folgeprojekt AmmoniaMot 2.

7. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ammoniak ist ein vielversprechender Energieträger, um Wasserstoff in großen Mengen und über weite Strecken zu transportieren, aber auch eine direkte Nutzung als Brennstoff ist möglich. Der Projektverbund AmmoniaMot verfolgt die ganzheitliche Entwicklung eines direkteinspritzenden, mit Diesel pilotierten Brennverfahrens.

Grundlegende Untersuchungen mit Einloch-Injektoren an einer Einhubmaschine der TUM bildeten die Basis für die Auslegung der Vollinjektoren. Zusätzlich konnte ein grundlegendes Verständnis für das Brennverhalten von Ammoniakstrahlen durch optische Messtechniken erzielt werden, worauf künftige Brennverfahren aufbauen können. Des Weiteren wurden die Messungen unter exakt kontrollierten Randbedingungen durchgeführt, was die Daten zur Validierung von CFD-Simulationen ermächtigt.

CFD-Simulationen der Verbrennung wurden bei MAN Energy Solutions und an der TUM durchgeführt. Grundlegende Simulationen fanden an der TUM statt. Bei der MAN lag der Fokus auf der Modellintegration in die bestehenden Entwicklungstools. Das beobachtete inerte Sprayverhalten konnte mit guter Übereinstimmung abgebildet werden. Die Untersuchung reaktiver Ammoniakstrahlen wurde basierend auf tabellierter Chemie mit zwei verschiedenen Verbrennungsmodellen durchgeführt: ECFM-3Z und ECFM-CLEH. Während das ECFM-3Z Modell eine zu schnelle Verbrennung vorhersagte und daher ungeeignet war, wurden mit dem ECFM-CLEH Modell gute Ergebnisse erzielt. Dies ist auf einen zusätzlichen, diffusiven Verbrennungsmodus im ECFM-CLEH Modell zurückzuführen. Die entwickelten CFD-Modelle werden im weiteren Projektverlauf zur Simulation von Einzylindertriebwerk und Vollmotoren verwendet.

Diese Vorbetrachtungen bilden eine wichtige Grundlage für die sich anschließenden Einzylinderuntersuchungen im WTZ Roßlau. Neben der Düsenkonfiguration liefern die Erkenntnisse auch eine Orientierungshilfe bei der Wahl des optimalen Einspritztimings und der Zündstrahlmenge. Zur Durchführung der Untersuchungen am Einzylinder-Forschungsmotor wurde eine aufwendige Ammoniakperipherie in Kooperation mit Neptun Ship Design ausgelegt und aufgebaut. Diese ermöglicht es Ammoniak mit einem Druck von bis zu 500 bar direkt in den Brennraum einzubringen und soll im nächsten Schritt zu einem modularisiertes, gekapseltes Kraftstoffsystem für den Einsatz an Bord von Schiffen weiterentwickelt werden. Ausgestattet ist das Einzylinderaggregat mit Motor-komponenten von MAN Energy Solutions. Diese ermöglichen es die Erkenntnisse im weiteren Verlauf auf einen großen, mittelschnelllaufenden Viertaktmotor zu übertragen,

damit zeitnah Lösungen für die direkte energetische Nutzung von Ammoniak in Schiffsmotoren zur Verfügung stehen und die maritimen Triebhausgasemissionen gesenkt werden können.

LITERATUR

- [1] Wissenschaftlicher Dienst des Deutschen Bundestages: Energieverbrauch bei der Produktion von mineralischem Stickstoffdünger. 2018.
- [2] V. Scharl, T. Sattelmayer, Ignition and combustion characteristics of diesel piloted ammonia injections, *Fuel Communications* 11 (2022) 100068. doi:10.1016/j.fueco.2022.100068.
- [3] V. Scharl, T. Lackovic, T. Sattelmayer, Characterization of ammonia spray combustion and mixture formation under high-pressure, direct injection conditions, *Fuel* 333 (2023) 126454. doi:10.1016/j.fuel.2022.126454.
- [4] V. Scharl, T. Sattelmayer, Investigation of post-injections for emission reduction of diesel-piloted ammonia spray combustion, in: 30th CIMAC Congress Busan, 2023.
- [5] Siemens Digital Industries Software. Simcenter STAR-CCM+. Version 2210. Siemens, 2022.
- [6] Krnac D, Manickam B, Holand P, Scharl V, Sattelmayer T: Ammoniak-Diesel Dual-Fuel Verbrennungssimulation unter Verwendung eines Ansatzes mit tabellierter Chemie. 19. Tagung Nachhaltigkeit in Mobilität, Transport und Energieerzeugung in Graz, 2023.
- [7] Stenzel K, Arndt H, Thorau P, Scharl V, Sattelmayer T: AmmoniaMot – Experimental investigations of an ammonia dual-fuel combustion process for decarbonization of the maritime sector. 7. Rostocker Großmotorentagung, 2022.
- [8] Thorau P, Stenzel K, Tolubajew T, Reiser C, Buchholz B: Entwicklung eines HPDF-Ammoniak-Brennverfahrens für schnelllaufende Schiffsmotoren. 12. Tagung Einspritzung und Kraftstoffe, 2023.

AMMONIAKMOTOR

ENTWICKLUNG VON SIMULATIONSWERKZEUGEN FÜR ZUKÜNFTIGE MARITIME
AMMONIAK-VERBRENNUNGSMOTOREN

AUTOREN

DR.-ING. MARTIN THEILE	FORSCHUNGSZENTRUM FÜR VERBRENNUNGSMOTOREN UND THERMODYNAMIK ROSTOCK GMBH, FVTR
DIPL.-MATH. TECHN. ANTJE HOPPE	FORSCHUNGSZENTRUM FÜR VERBRENNUNGSMOTOREN UND THERMODYNAMIK ROSTOCK GMBH, FVTR
DR.-ING. SASCHA PREHN	UNIVERSITÄT ROSTOCK, LEHRSTUHL FÜR KOLBENMASCHINEN UND VERBRENNUNGSMOTOREN, LKV
DIPL.-ING. TILL MANTE	UNIVERSITÄT ROSTOCK, LEHRSTUHL FÜR KOLBENMASCHINEN UND VERBRENNUNGSMOTOREN, LKV
PROF. DR.-ING. BERT BUCHHOLZ	UNIVERSITÄT ROSTOCK, LEHRSTUHL FÜR KOLBENMASCHINEN UND VERBRENNUNGSMOTOREN, LKV
DR.-ING. LARS SEIDEL	LOGE DEUTSCHLAND GMBH, LOGE
M. SC. LAURA GONZALES	LOGE DEUTSCHLAND GMBH, LOGE
PROF. DR.-ING. FABIAN MAUSS	BRANDENBURG TECHNISCHE UNIVERSITÄT, LEHRSTUHL FÜR THERMODYNAMIK/THERMISCHE VERFAHRENSTECHNIK, TDTVT

1. MOTIVATION UND ZIELSETZUNG

Aufgrund der weltweiten CO₂-Emissionen der See- und Binnenschifffahrt ist eine Dekarbonisierung in dieser Branche zwingend notwendig, um gesetzte nationale, EU- oder weltweite Klimaziele erreichen zu können. Durch langen Betriebsdauern von Schiffen - insbesondere Binnenschiffen, deren Durchschnittsalter in Deutschland ca. 48 Jahre beträgt - müssen die CO₂-Emissionen der Bestandsflotte reduziert werden. Dies bedeutet, dass der Fokus zukünftig stark auf klimaneutrale Kraftstoffe gelegt werden wird. Mit klassischen regenerativ erzeugten Kraftstoffen (z. B. synthetisches Methan, E-Methanol, synthetische paraffinische Kraftstoffe, usw.) kann zwar eine vollständige Klimaneutralität erreicht werden, in Zukunft kann jedoch die Verfügbarkeit von CO₂ für die Synthese herausfordernd werden. Hier bietet Ammoniak (NH₃) als Wasserstoffträger auf Stickstoffbasis eine mögliche Alternative. Es gilt aufgrund seiner Verwendung in der Landwirtschaft und in industriellen Prozessen als eine der bekanntesten chemischen Substanzen. Trotz herausfor-

derder Flammeneigenschaften hinsichtlich Zündwilligkeit und Flammgeschwindigkeit ist es in der maritimen Industrie als nahezu sichergestellt, dass Ammoniak als ein zukünftiger klimaneutraler motorischer Kraftstoff genutzt werden wird.

Durch die Umstellung von kohlenstoffbasierten Kraftstoffen auf den stickstoffbasierten Kraftstoff Ammoniak können die Emissionen von unverbrannten Kohlenwasserstoffen (einschließlich Methanschlupf) und Partikeln vermutlich auf nahezu Null reduziert werden. Somit besteht das Potenzial eines "Null-Kohlenstoff-Emissions"-Schiffes, wodurch sowohl lokale als auch globale (z.B. CO₂-Emissionen) umweltschädliche Auswirkungen reduziert oder ganz vermieden werden.

Das vorgestellte Verbundvorhaben „AmmoniakMotor“ hat sich das Ziel gesetzt, die innermotorische Verbrennung von Ammoniak als Kraftstoff an einem realen Motor zu untersuchen und entsprechende Simulationsmodelle zu entwickeln, um zukünftige Retrofit-Konzepte für die Binnenschifffahrt erarbeiten zu können.

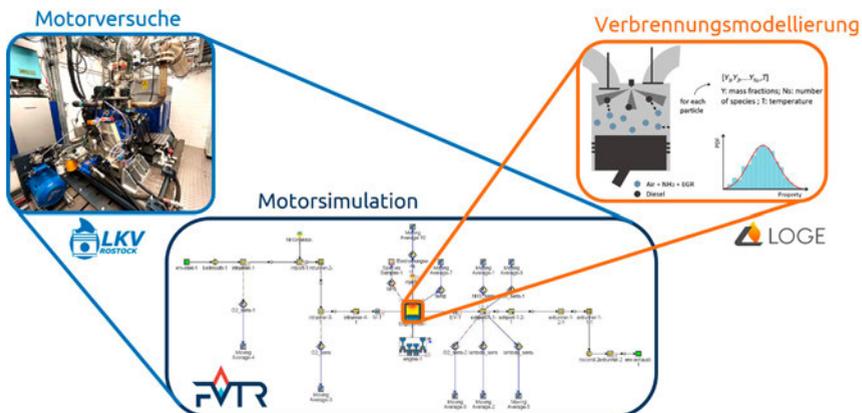


Abb. 1: Zusammenspiel der Projektpartner im Verbundprojekt „AmmoniakMotor“ zur Modellierung der innermotorischen Ammoniakverbrennung

2. AMMONIAK ALS KRAFTSTOFF

Ammoniak kann als Kraftstoff in gasförmiger oder flüssiger Form und als Direkt- oder Saugrohreinspritzung motorisch eingesetzt werden. Es ist mit Diesel, Benzin oder anderen alternativen Kraftstoffen wie Wasserstoff, Biodiesel und synthetischen Dieselmotorkraftstoffen kombinierbar. Das in diesem Beitrag behandelte motorische Brennverfahrenskonzept wird in Abbildung 2 hervorgehoben und im Detail dargestellt.

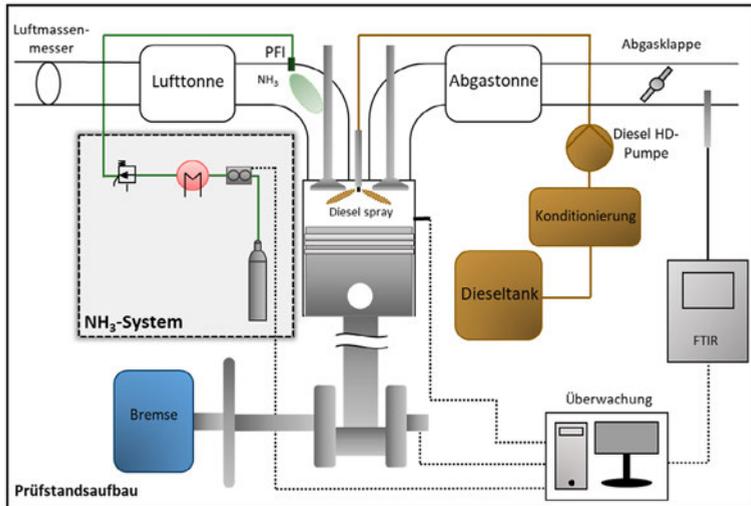


Abb. 2: Schema des im Verbundprojekt „AmmoniakMotor“ verwendeten Prüfstands des NH_3 -Forschungsmotors

Wie in vielen bereits durchgeführten Studien (siehe [1,2,3]) wird ein Dual-Fuel-Brennverfahren mit Diesel als Zündkraftstoff untersucht, im Vergleich zu [3] jedoch im Rahmen einer Saugrohreinspritzung, da hier ein höheres Retrofitpotential unterstellt wird. Die Zahl der Veröffentlichungen zur reinen Ammoniakverbrennung als dieselmotorisches Konzept ist gering (siehe z.B. [4,5]), da für eine Selbstzündung hohe Verdichtungsverhältnisse von bis zu 35:1 notwendig sind. Der übliche Weg ist daher der Einsatz eines Promotors mit hoher Selbstzündungsneigung (z.B. Diesel).

Die größte Herausforderung bei der Verwendung von Ammoniak als Kraftstoff ist seine hohe Toxizität und die damit verbundenen Sicherheitsanforderungen. Dies erfordert eine sensible und genaue Sicherheitstechnik, insbesondere für die in diesem Verbundprojekt verwendeten Prüfstandsanlagen. Räume, welche potenziell mit Ammoniak kontaminiert werden könnten, müssen entsprechend mit Gasetektoren und einer gekoppelten permanenten Gaswarnanlage ausgestattet werden. Eine ausreichende Belüftung sowie entsprechende Personenschutz ausrüstung (z.B. Gasmaske und Ganzkörperanzug) sind bei Arbeiten mit Ammoniak zwingend notwendig.

Bezüglich des Verbrennungsverhaltens weist Ammoniak Nachteile gegenüber herkömmlichen Brennstoffen auf und kann daher nicht 1:1 ersetzt werden. Die wichtigsten Eigenschaften für die Verbrennung sind im Folgenden aufgeführt:

- › Selbstentzündungstemperatur: 630 °C → deutlich höher als bei Diesel ($180\text{-}320\text{ °C}$) [6]
- › Laminare Flammgeschwindigkeit: $0,07\text{ m/s}$ → deutlich niedriger als bei Benzin ($0,4\text{ m/s}$) oder Methan ($0,37\text{ m/s}$) (alle bei Standardbedingungen) [7]

› Adiabate Flammentemperatur: 1800 °C → niedriger als bei vielen anderen Kraftstoffen (Diesel: 2327 °C, Benzin: 2307 °C, Methan: 1950 °C)

Ein dieselähnlicher Verbrennungsprozess mit Selbstzündung und diffusionsgesteuerter Verbrennung ist aufgrund der Selbstzündungstemperatur technisch nicht sinnvoll. Die laminare Flammgeschwindigkeit wiederum erschwert die vollständige Umsetzung bei vorgemischter (ottomotorischer) Verbrennung, was klassische Magerbrennverfahren im Vergleich zu z.B. heutigen Erdgasmotoren deutlich eingeschränkt. Es werden daher höhere Flammentemperaturen erwartet, sodass thermische Stickoxidbildung ausgeprägter ist. Hohe Wasseranteile und eventueller Ammoniakchlupf ergeben neue Herausforderungen bei der Abgasnachbehandlung. Die Bildung von Lachgas (N_2O) ist aufgrund des hohen Treibhausgasfaktors (~ 300) zu vermeiden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt von Ammoniak ist seine Korrosivität im Zusammenspiel mit Metallen auf Kupferbasis oder Dichtungsmaterialien (z.B. in Rohren, Ventilen, Messsystemen, Einspritzdüsen). Um Leckagen nach kurzer Zeit zu vermeiden, müssen die Systeme sorgfältig geplant werden. Das Korrosionsverhalten von Ammoniak gegenüber verschiedenen Werkstoffen, welche im Motorenbau verwendet werden, ist noch nicht umfassend erforscht.

3. MOTORISCHER NH₃-FORSCHUNGSPRÜFSTAND

3.1. PRÜFSTANDSAUFBAU UND SICHERHEITSFRAKTRUKTUR

Beim LKV wurde ein 1-Zylinder-Forschungsmotor auf Dual-Fuel-Betrieb mit Ammoniak und Diesel umgerüstet. Abbildung 3 zeigt den verwendeten Prüfstand und Versuchsträger.

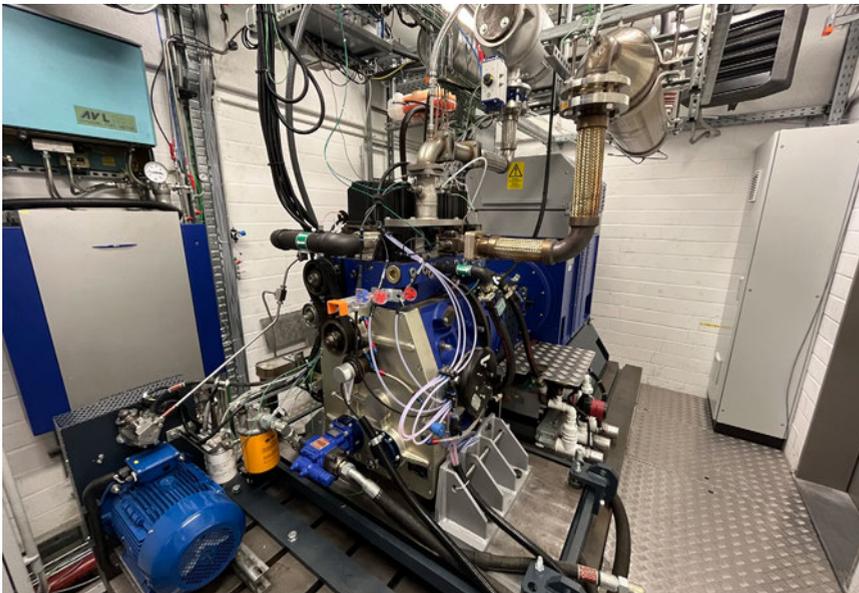


Abb. 3: 1-Zylinder NH₃-Forschungsmotor am LKV, Universität Rostock.

Ein validierter Dieselbetrieb bildet die Grundlage für die Untersuchung des Dual-Fuel-Konzepts. Der Prüfstand verfügt über ein voll konditionierbares Ansaugluftsystem. Dazu gehören die Verbrennungsluftzufuhr durch einen Kompressor, ein Druckregelventil, ein Massenstrommesssystem, eine elektrische Heizung und auf der Abgasseite ein Regelventil zur Realisierung des Gegendrucks. Das Dieselkraftstoffsystem kann in der Kraftstofftemperatur und im Raildruck variiert werden. Das Kühlwasser- und das Ölsystem sind ebenfalls temperierbar. Mit einem offen zugänglichen Forschungsmotorsteuergerät kann ein sehr breites Spektrum an Motorbetriebsparametern (z. B. freie Variation der Einspritzzeiten und -dauern) realisiert werden.

Das Ammoniak-Kraftstoffsystem (Abbildung 4) ist ebenfalls in Einspritzdruck, Temperatur und Menge variabel. Der Ammoniak wird in einer Gasdruckflasche gespeichert. Um die Sicherheit zu gewährleisten, befindet sich diese in einem permanent belüfteten Gasflaschenschrank im Prüfstandsraum, in welchem sich ebenfalls das gesamte Kraftstoffsystem befindet, damit mögliche Leckagen den Prüfstandsraum nicht kontaminieren. Ein Gassensor in der Abluft des Schrankes detektiert mögliche Ammoniaklecks. Zur Sicherheitstechnik gehören auch eine ausreichend starke Belüftung des Prüfstandsraums, zusätzliche Gassensoren, ein Gaswarnsteuergerät, Gasmasken, eine Notdusche und ein Sauerstoffatmergerät für Noffälle. Die Verfahren zum Wechseln, Öffnen und Schließen der Gasflasche oder zum Abschalten des Prüfstands am Ende des Arbeitstages sind streng geregelt, so dass der gesamte Prüfstand so sicher wie möglich ist.

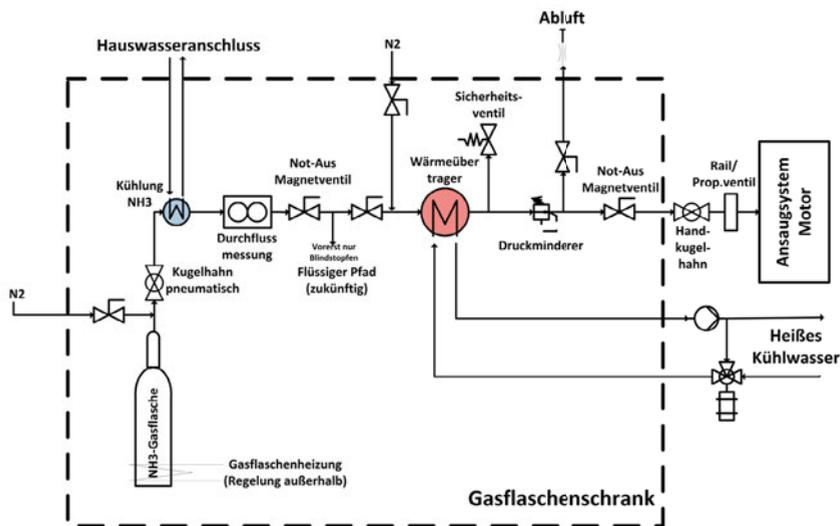


Abb. 4: Im Rahmen des Verbundprojekts „AmmoniakMotor“ aufgebautes Ammoniak-Kraftstoffsystem am LKV der Universität Rostock.

Die relevanten Motorparameter des 1-Zylinder Motors sind in Tabelle 1 aufgeführt:

Tab. 1: Motorparameter

1 Zylinder, 4-Takt Diesel	
Nenndrehzahl	2.300 1/min
Nennleistung	45 kW
Bohrung	110 mm
Hub	136 mm
Hubvolumen	1,29 l
Verdichtungsverhältnis	16,4:1
Ansaugsystem	extern

3.2. Kraftstoffsystem

Der sichere Umgang mit Ammoniak ist ein entscheidendes Kriterium für seinen Einsatz als Kraftstoff. Das Kraftstoffsystem ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt. Das Ammoniak wird in flüssiger Form entnommen, aufbereitet und nach Messung des Massenstroms mit einem Coriolis-Messsystem verdampft. Bei Bedarf kann das Ammoniak auch im flüssigen Zustand in den Motor transportiert werden. Nach der Verdampfung regelt ein Druckminderer das gasförmige Ammoniak auf den gewünschten Druck und ein Proportionalventil bzw. spezielle Gasespritzdüsen steuern die Masse des Ammoniaks, die der Verbrennungsluft am Motoransaugrohr beigemischt wird. Mehrere Kugel- und Magnetventile, die im Standardzustand geschlossen sind, können den Ammoniakfluss im Notfall unterbrechen. Ein Sicherheitsventil, mehrere Spülanschlüsse für Stickstoff zum Spülen der Leitungen wurden verbaut. Neben den internen Verbrennungsvorgängen und Emissionen werden auch Verschleiß- und Schmierstoffeffekte untersucht. Im angeschlossenen Schmierstofflabor des LKV werden Ölproben analysiert und bewertet und damit sehr schnell Anzeichen von Verschleiß und Veränderung der Schmiereigenschaften festgestellt.

4. SIMULATIONSMODELLE

4.1. Stochastisches Reaktormodel (SRM)

Das SRM wird in dieser Studie zur Modellierung des Verbrennungsprozesses verwendet. Es berücksichtigt Turbulenz- und Inhomogenitätseffekte während der Verbrennung. Bei der Berechnung wird die Homogenität der Brennkammer durch eine statistische Verteilung dargestellt und die physikalischen Größen werden durch eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (probability density function, PDF) beschrieben (siehe [8,9,10,11,12]). Beim SRM wird die Masse im Reaktor stochastisch in virtuelle Pakete, sogenannte Partikel, aufgeteilt. Jedes Teilchen hat seine eigene chemische Zusammensetzung, Temperatur und Masse und kann sich mit anderen Teilchen vermischen und Wärme mit den Wänden austauschen [10].

In den Transportgleichungen werden über Quellterme unter anderem die Kolbenarbeit, die konvektive Wärmeübertragung, chemische Reaktionen, Kraftstoffdirekteinspritzung und

Verdampfung abgebildet. Des Weiteren wird die molekulare Durchmischung aufgrund von Turbulenz über einen Term modelliert. Um das Gleichungssystem zu schließen, wird ein modifiziertes Euclidean Minimum Spanning Tree (EMST) Mischungsmodell verwendet (siehe [13,14]), welches die Lokalität im Partikelmischungsprozess für den Mischungsanteil berücksichtigt. Infolgedessen können sich nur benachbarte Partikel im Mischungsanteilsraum miteinander vermischen.

Das SRM beinhaltet ein phänomenologisches Turbulenzmodell zur Berechnung der skalaren Mischung auf Basis verschiedener Parameter für die Ladungsbewegung im Brennraum (z. B. Drall, Squish, etc.). Die entsprechenden Faktoren müssen für den jeweiligen Motor kalibriert werden. Die Kalibrierung wurde mit Hilfe des LOGEngine-Expertensystems mit der experimentellen Druckkurve des Betriebspunkts mit reinem Diesel als Ziel durchgeführt. Es wurde eine gute Übereinstimmung zwischen der experimentellen Druckkurve und der Modellvorhersage erreicht, wie in einem späteren Abschnitt gezeigt wird.

4.2. Chemiemodell

Der im Experiment verwendete kommerzielle Diesel wurde durch ein 3-Komponenten-Surrogat modelliert, das aus 17,2 Vol.-% 1-Methylnaphtalen für die aromatische Fraktion, 76,1 Vol.-% n-Decan für die n-Alkan-Fraktion und 6,7 Vol.-% Methyldecanoat zur Modellierung des FAME-Gehalts besteht.

Das chemische Modell für die Kraftstoffoxidation und Emissionsbildung basiert auf dem aktuellen LOGefuel-Reaktionsmodell. Das Modell für n-Decan und Methyldecanoat wurde aus [15,16] übernommen und aktualisiert, um eine bessere Übereinstimmung mit den Experimenten zur Zündverzögerungszeit und Emissionsbildung zu erzielen. Ein Vergleich der vorhergesagten und gemessenen Zündverzögerungszeit für n-Decan ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Teilmodelle für die Ammoniakoxidation und die NO_x -Chemie wurden aus [17,18] übernommen. Der detaillierte Reaktionsmechanismus bestand aus 1.307 Spezies und wurde dann mit der in [16,19] beschriebenen Technik auf 491 Spezies reduziert, um die Berechnungszeit zu verkürzen.

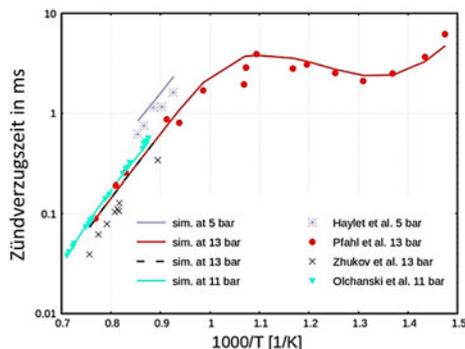


Abb. 5: Vergleich der vorhergesagten und gemessenen Zündverzögerungszeiten von n-Decan/Luft-Gemischen in Stoßrohren bei unterschiedlichen Drücken

4.3. Druckverlaufsanalyse-Tool

Zur OD-Analyse des Verbrennungsprozesses setzt FVTR eine hauseigene thermodynamische Druckverlaufsanalyse-Software ein. Ausgehend von der gemessenen hochaufgelösten Zylinderdruckkurve des Motors und weiteren stationären Messdaten (z. B. Kraftstoff- und Luftmassenströme, NH_3 -Anteil) werden zeitliche Verläufe (z. B. Brennverlaufsrate, Temperaturverlauf) sowie globale Parameter und Mittelwerte (z. B. Zündzeitpunkt, Zündverzögerung, Verbrennungsschwerpunkt, indizierter Mitteldruck) ermittelt. Als Grundlage wird ein nulldimensionales Ein-Zonen-Modell verwendet, in dem die Zylinderfüllung als ideal homogenisiertes Gas betrachtet wird. Für den geschlossenen Prozess der Hochdruckphase werden Massen, Spezies und Energie entsprechend der Auflösung der Druckdaten thermodynamisch bilanziert, um auf den Verbrennungsprozess zu schließen. Die Verwendung von Ammoniak wird sowohl in der Verbrennungsgleichung als auch bei der Bestimmung der thermophysikalischen Eigenschaften berücksichtigt. Für die Verbrennung wird ein Modellbrennstoff aus Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff ($\text{C}_v\text{H}_w\text{O}_x\text{N}_y$) auf Basis des NH_3 -Anteils berechnet und eine globale Gleichung für die stöchiometrische Umsetzung formuliert. Die kalorischen Eigenschaften werden über NASA-Polynome [19] bestimmt, um den Einfluss der unterschiedlichen Kraftstoff- und Abgaszusammensetzungen auf die thermodynamischen Eigenschaften (z. B. spezifische Wärmekapazität) zu berücksichtigen. Somit werden die Eigenschaften von Ammoniak in allen modellierten Bilanzen (Massen-, Spezies-, Energiebilanz) berücksichtigt. Die mit diesem Tool erstellten Brennverläufe werden zum Vergleich mit den von LOGE vorhergesagten Simulationskurven verwendet.

4.4. GT-Power Modell

Im Rahmen des Projektes wurde ein OD/1D Modell des NH_3 -Forschungsmotors mit Hilfe der kommerziellen Software GT-Power erstellt. Entsprechend den Umbauarbeiten am LKV wurde die Ansaug- und Abgasstrecke inkl. Luft- und Abgasberuhigungstonne berücksichtigt. Des Weiteren wurde eine Ammoniakeindüsung in den Luftpfad vor dem Einlassventil implementiert. Das Modell ist in Abbildung 1 dargestellt.

Im Rahmen des Projektes wurde zunächst mit Hilfe der bereits implementierten Dual-Fuel-Verbrennungsmodelle eine Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlicher Substitutionsraten von Ammoniak untersucht. Dabei wurde die Dieseleinspritzung über das „DIPulse“ Modell abgebildet, während die vorgemischte Ammoniakverbrennung über das „SITurb“ Modell abgebildet wird, welches basierend auf der laminaren Flammgeschwindigkeit des Ammoniaks sowie der Ladungsbewegung die turbulente Verbrennungsgeschwindigkeit berechnet. Es wurden ebenfalls virtuelle Sensoren zur Detektion des Ammoniak schlupfes integriert.

Im Verlauf des Projektes wurde dann das von LOGE entwickelte Ammoniak-Diesel SRM mit dem GT-Power Modell gekoppelt, um prädiktive Aussagen über das motorische Verhalten treffen zu können.

5. SIMULATIONS- UND EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

5.1. Voruntersuchungen mit GT-Power

Im Rahmen von Voruntersuchungen wurde zunächst mit Hilfe des GT-Power Modells eine Modellvalidierung anhand verschiedener Diesel-Referenzpunkte durchgeführt. Infolgedessen wurden die Auswirkungen einer Substitution des Diesels mit Ammoniak untersucht. Exemplarisch sind die Ergebnisse in Abbildung 6 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass eine Substitution mit geringen Mengen Ammoniak zunächst zu einer Steigerung der Brennrate führt, jedoch bei höheren Substitutionsraten (hier 50% energetisch) durch die geringeren Umsetzungsraten des Ammoniakanteils infolge der geringen Flammgeschwindigkeiten die Brennraten abnehmen und die Brenndauern entsprechend zunehmen. Des Weiteren ist eine signifikante Steigerung des Zündverzugs zu beobachten. Diese Vorergebnisse wurden verwendet, um die experimentellen Untersuchungen zu unterstützen. Im weiteren Verlauf wurde das GT-Power Modell mit dem SRM gekoppelt und weitere Detailanalysen der Verbrennung durchgeführt.

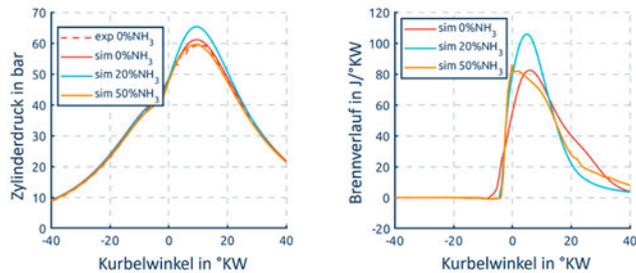


Abb. 6: Exemplarische simulierte Brennverläufe als Ergebnis einer Substitution von Diesel mit Ammoniak (0%, 20% und 50% energetisch)

5.2. Experimentelle Untersuchungen

Es wurden unterschiedliche Messreihen am Versuchsträger durchgeführt, um eine Datenbasis für die Modellentwicklung und das allgemeine Verständnis der innermotorischen Ammoniak-Diesel Dual-Fuel Verbrennung zu erlangen.

Die durchgeführten Messreihen begannen stets im reinen Dieselbetrieb als Referenz. Ab diesem Zeitpunkt wurde der Verbrennung nach und nach Ammoniak zugesetzt und gleichzeitig weniger Dieselmotorkraftstoff eingespritzt. Die Gesamtenergiemenge der beiden Kraftstoffe wurde konstant gehalten. Um die Substitutionsrate zu erhöhen, wurde die Dauer der Diesel-Hauptinspritzung schrittweise verkürzt.

Abbildung 7 zeigt die Druck- und Brennverläufe für verschiedene Substitutionsraten. Die Druckkurve zeigt einen stetigen Anstieg des Maximaldrucks über der Substitutionsrate. Bei 80% Substitution sinkt der maximale Zylinderdruck. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nicht genügend Zündenergie aus dem Diesel vorhanden ist, um das Ammoniak-Luftgemisch ausreichend zu entflammen. Der 80 %-Punkt ist daher nur bedingt vergleichbar und wird

als Betriebspunkt für die Modellierung nicht berücksichtigt. Die Verbrennung der Diesel-pilotmasse ist deutlich am Brennverlauf des reinen Dieselpunktes (orange) zu erkennen. Die Intensität der Vorverbrennung liegt hier knapp unterhalb des Niveaus der Hauptverbrennung.

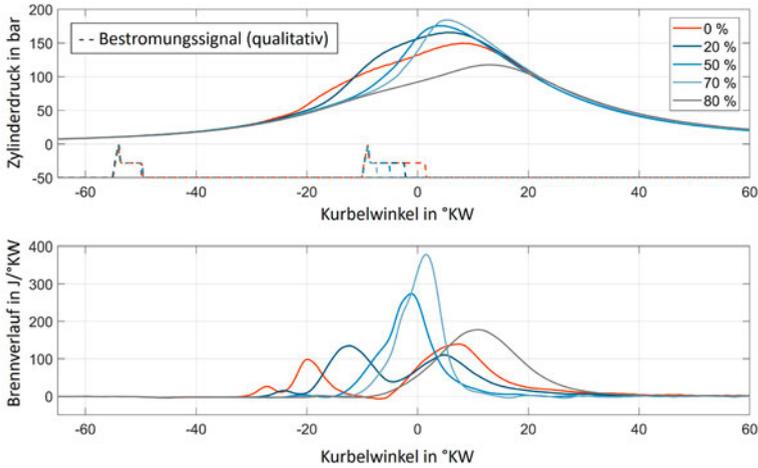


Abb. 7: Druckkurven aus dem Experiment des LKV und Brennverläufe der FVTR für die Substitution von Diesel (Verkürzung der Haupteinspritzdauer)

Abbildung 8 zeigt die Rohemissionen für verschiedene Substitutionsraten. Der Ammoniak-schlupf steigt leicht auf 383 ppm (bei 70% Substitutionsrate). Im Vergleich zu Untersuchungen verschiedener Forschungsgruppen bei gleichem Brennverfahren liegen die Ammoniakemissionen auf einem sehr niedrigen Niveau. Bei 80%, wo die Verbrennung unvollständig ist, steigt der Ammoniak-schlupf auf 3.700 ppm an. Die Substitution von Diesel führt zudem zu einem Rückgang der CO-Emissionen.

Um die gesamten Treibhausgasemissionen zu betrachten, müssen auch die N₂O-Emissionen berücksichtigt werden. Ausgehend von einer reinen Dieserverbrennung steigt die Konzentration mit zunehmendem Substitutionsgrad (außer 80 %) auf 10-20 ppm an. Die Senkung des Dieselmassenstroms geht damit dennoch mit einer stetigen Verringerung der CO₂-Emissionen einher. Es kann eine Reduktion von ca. 70% erreicht werden.

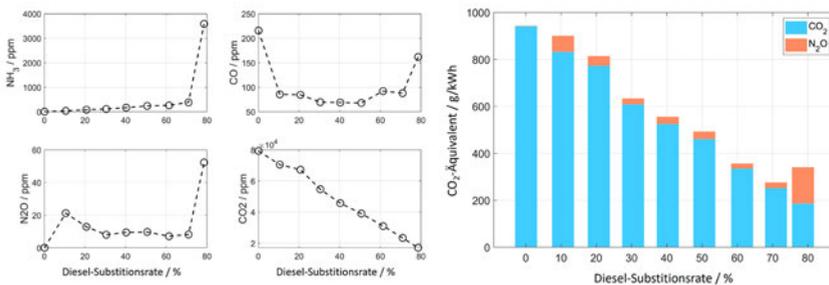


Abb. 8: Rohabgasemissionen und CO₂-Äquivalent über der Substitutionsrate

5.3. Simulationsergebnisse

Die Modellierung wurde äquivalent zu einer hypothetischen realen Nachrüstung durchgeführt, bei der nur Informationen über den reinen Dieselmotor zur Verfügung stehen. Das bedeutet, dass die Parameter des $k-\epsilon$ -Modells nur so trainiert wurden, dass sie der gemessenen Druckkurve für reinen Diesel entsprechen. Das $k-\epsilon$ -Modell ist in der Lage, die Auswirkungen unterschiedlicher Einspritzzeitpunkte und -dauern auf die Turbulenz und die Durchmischung zu erfassen.

Die Emissions- sowie die Verbrennungsvorhersage für Betriebspunkte mit Ammoniak werden ohne Anpassung der Parameter im Verbrennungsmodell erzielt. Die Experimente wurden genutzt, um empfindliche Reaktionen für die Ammoniak-Kohlenwasserstoff-Wechselwirkungen einzustellen.

Mit Hilfe des detaillierten Chemiemodells wurde zunächst eine detaillierte Analyse des Verbrennungsverhaltens durchgeführt. Unter anderem wurden verbrennungsrelevante Spezies wie HO_2 , H_2O_2 , Alkylperoxid-Radikale, OH sowie stickstoffhaltige Zwischenprodukte analysiert, um die Oxidationspfade zu identifizieren, mit Literaturdaten abzugleichen und die Reaktionskonstanten spezifischer Reaktionspfade im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse anzupassen [21,22].

In Abbildung 9 ist dargestellt, dass das SRM-Modell in der Lage ist, die Verzögerung des Verbrennungsbeginns bei erhöhter Ammoniakmenge vorherzusagen. Für die meisten Betriebspunkte wird eine gute Übereinstimmung im Druckverlauf gefunden. Die Anzahl der Brennverlaufsspitzen und das Verschwinden des Hauptzündungsereignisses der Pileiteinspritzung für 70% Ammoniak werden gut vorhergesagt. Es wurden im Rahmen dieses Verbundprojektes jedoch verbrennungs- und damit emissionsrelevante Phänomene entdeckt, welche komplex sind (z.B. komplexe Mehrfacheinspritzstrategien). Dies unterstreicht, dass es bei der Modellierung der NH_3 /Kohlenwasserstoff-Verbrennung noch viele Unbekannte gibt.

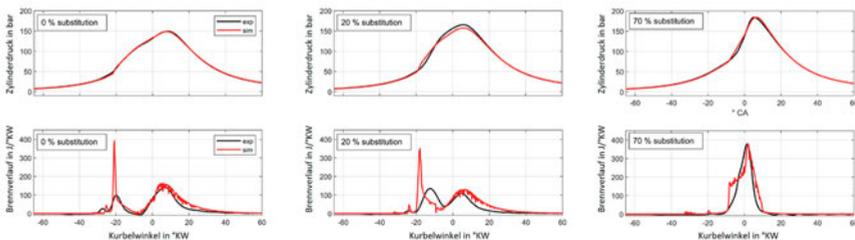


Abb. 9: Vergleich zwischen experimentellen und Simulationsergebnissen hinsichtlich Druckverläufe (oben) und Brennverläufe (unten).

Eine Übersicht über die gemessenen und vorhergesagten Abgasemissionen ist in Abbildung 10 dargestellt. Es ist festzustellen, dass die vorhergesagten O_2 - und CO_2 -Abgasemissionen innerhalb der experimentellen Unsicherheit liegen, was beweist, dass die Ausgangsbedingungen und die Zusammensetzung des Ersatzbrennstoffs nahe am experimentellen Aufbau liegen. Die vorhergesagten NO-Emissionen liegen nahe an den Messwerten für reinen Diesel und 70 % Ammoniak, und der Trend zu geringeren NO-Emissionen bei 30 und 40 % Substitutionsrate wird vorhergesagt. Bei den (relativ geringen) CO- und NH_3 -Emissionen werden große Abweichungen festgestellt. Das Modell sagt beide Emissionen deutlich zu niedrig voraus. Eine mögliche Erklärung ist, dass eine beträchtliche Menge an vorgemischtem Ammoniak und unverbranntem Brennstoff im Spaltvolumen eingeschlossen ist, was bei der Modellierung nicht berücksichtigt wird. Ebenfalls kann nicht ausgeschlossen werden, dass die vorhandene geringe Ventilüberschneidung Ursache für den Ammoniakslupf ist. Der Anstieg von N_2O für 0 bis 10 % Ammoniakanteil ist gut vorhergesagt. Bei steigenden Substitutionsraten gibt es leichte Abweichungen, welche durch weitere Parametrierung der Modelle reduziert werden. Insgesamt ist die Vorhersagequalität ausreichend und wird im weiteren Projektverlauf weiter gesteigert werden.

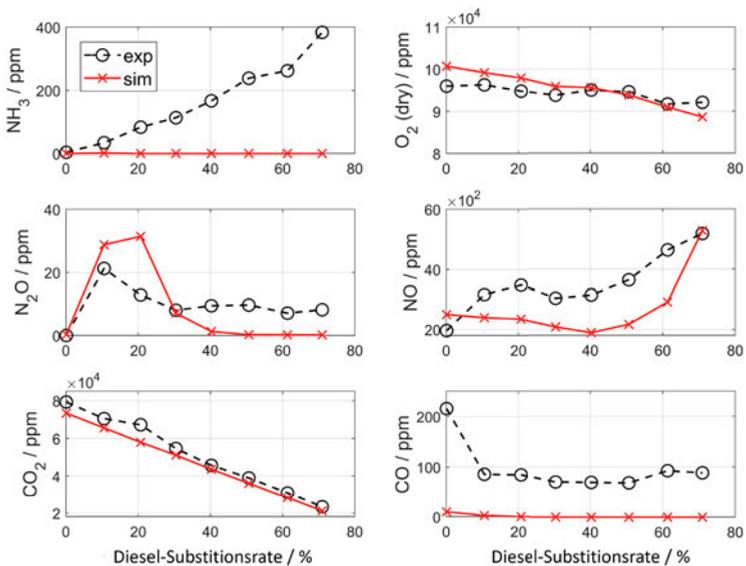


Abb. 10: Vergleich von gemessenen und vorhergesagten Emissionen ohne Berücksichtigung von Ventilüberschneidung

6. ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag wird die sehr erfolgreiche Entwicklung eines effizienten Ammoniak/Diesel-Dual-Fuel-Brennverfahrens mit Substitutionsraten von bis zu 70 % bei sehr geringen Ammoniakslupf- und N_2O -Emissionen vorgestellt und diskutiert. Die gesamten Treibhausgasemissionen konnten signifikant gesenkt werden (ca. 70%). Dies wurde maßgeblich durch die Entwicklung einer innovativen Einspritzstrategie erreicht, welche die herausfor-

dernden Eigenschaften des Kraftstoffes Ammoniak deutlich überkompensiert. Der entwickelte Verbrennungsprozess weist einige komplexe Verbrennungsmerkmale auf, wie z.B. eine ausgeprägte Niedertemperaturverbrennung als Ergebnis einer sehr frühen Dieselpiloteinspritzung und die Auswirkung von erhöhtem vorgemischtem Ammoniak auf die Wärmefreisetzungsrate des Piloten [21].

Im Rahmen des Verbundprojektes wurden Simulationsmodelle entwickelt, die eine Berechnung und Analyse dieser komplexen innermotorischen Verbrennung erlauben. Die Modellierung dieses Brennverfahrens ist durch die Wechselwirkung zwischen der Niedertemperaturverbrennung von Kohlenwasserstoffen und dem Ammoniakgehalt eine Herausforderung. Die entwickelten Modelle zeigen eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Brennverlaufs- und Druckverläufen, während die Ammoniak- und CO-Emissionen nur leicht unterschätzt werden. Dies ist Gegenstand aktueller Entwicklung.

Die gesamte Untersuchung betrachtet nur die Rohemissionen des Motors, potenzielle Abgasnachbehandlungssysteme sind aktuell kein Teil der Untersuchungen. Durch die Entwicklung spezieller Systeme für diesen Anwendungsfall wird es möglich sein, die Emissionen noch weiter zu senken und somit auch hinsichtlich der NO_x -Emissionen die erforderlichen Grenzwerte zu unterschreiten. Mit einer angenommenen Umsetzungsrate eines SCR-Katalysators von 90% entsprechen die NO_x -Emissionen für eine Substitutionsrate von 70 % bspw. schon den IMO TIER 3 Grenzwerten für die Schifffahrt [18]. Weiterhin können die NH_3 - und N_2O -Emissionen mit Abgasnachbehandlungssysteme weiter gesenkt werden.

Zusammen mit einer Retrofitlösung kann Ammoniak als Kraftstoff insgesamt einen hohen Nutzen für die umweltfreundliche Schifffahrt bringen. In weiteren Untersuchungen wird eine Erhöhung des Ammoniakanteils bei angepassten Einspritzparametern des Dieselpilots analysiert, um die Potentiale eines Retrofit-Brennverfahrens genauer beurteilen zu können. Mit mehr Erkenntnissen über den Verbrennungsprozess werden somit weitere Betriebsarten auf dem Prüfstand ausgearbeitet werden können. Auch wenn der Verbrennungsprozess gut funktioniert, ist er noch nicht vollständig verstanden und soll weiter erforscht werden.

LITERATUR

- [1] Førby, N., Thomsen, T., Cordtz, R., Bræstrup, F. and Schramm, J. 2023. Ignition and combustion study of premixed ammonia using GDI pilot injection in CI engine, *Fuel*, 331
- [2] Nadimi, E., Przybyła, G., Lewandowski, M. and Adamczyk, W. 2023. Effects of ammonia on combustion, emissions, and performance of the ammonia/diesel dual-fuel compression ignition engine, *Journal of the Energy Institute*, 107
- [3] Stenzel, K., Arndt, H., Thorau, P., Scharl, V. and Sattelmayer, T. 2022. AmmoniaMot – Experimental investigations of an ammonia dual-fuel combustion process for decarbonization of the maritime sector, 7th Rostock Large Engine Symposium, Rostock, Germany
- [4] Tornatore, C., Marchitto, L., Sabia, P. and De Joannon, M. 2022. Ammonia as Green Fuel in Internal Combustion Engines: State-of-the-Art and Future Perspectives, *Frontiers in Mechanical Engineering*, Vol. 8:944201
- [5] Gray, J., Dimitroff, E., Meckel, N. and Quillian, R. 1967. Ammonia Fuel-Engine Compatibility and Combustion, *SAE Trans*, 75, 785–807
- [6] Gupta B. 2008. Hydrogen fuel production, transport and storage, CRC Press
- [7] Theile, M., Drescher, M., Reska, M., Dahms, F. and Swiderski, E. 2022. Development of a GHG-neutral combustion concept exemplified by methanol, 7th Rostock Large Engine Symposium, Rostock, Germany
- [8] Pasternak, M. 2016. Simulation of the Diesel Engine Combustion Process Using the Stochastic Reactor Model, Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg
- [9] Kraft, M. 1998. Stochastic Modeling of Turbulent Reacting Flow in Chemical Engineering, VDI Verlag
- [10] Tuner, M. 2008. Stochastic Reactor Models for Engine Simulations, Lund
- [11] Pope, S. 1985. Pdf Methods for Turbulent Reactive Flows, *Progress in Energy and Combustion Science*, 11(2):119-192
- [12] Harworth, D. 2010. Progress in Probability Density Function Methods for Turbulent Reacting Flows, *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(2):168-259
- [13] Franken, T., Sommerhoff, A., Willems, W., Matrisciano, A. et al. 2017. Advanced Predictive Diesel Combustion Simulation Using Turbulence Model and Stochastic Reactor Model, SAE Technical Paper 2017-01-0516, doi:10.4271/2017-01-0516
- [14] Bernard, G., Scaife, M., Bhawe, A., Ooi, D. et al. 2016. Application of the SRM Engine Suite over the Entire Load Speed Operation of a U.S. EPA Tier 4 Capable IC Engine, SAE Technical Paper, 2016-01-0571
- [15] Xiaoxiao Wang. 2018. Kinetic mechanism of surrogates for biodiesel, Brandenburg University of Technology Cottbus

- [16] Matrisciano, A., Seidel, L., Mauss, F. 2022. An a priori thermodynamic data analysis based chemical lumping method for the reduction of large and multi-component chemical kinetic mechanisms, *International Journal of Chemical Kinetics*, 54:523-540
- [17] Shrestha, K., Giri, B., Elbaz, A., Issayev, G., Roberts, W., Seidel, L., Maus, F. 2022. A Detailed Chemical Insights into the Kinetics of Diethyl Ether Enhancing Ammonia Combustion and the Importance of NO_x Recycling Mechanism, *A Farooq Fuel Communications*, 10:100051
- [18] Manna, M., Sabia, P., Shrestha, K., Seidel, L., Raqucci, R., Mauss, F., de Joannon, M. 2022. NH₃-NO interaction at low-temperatures: An experimental and modelling study, *Proceedings of the Combustion Institute 2022*
- [19] Seidel, L., Netzer, C., Hilbig, M., Mauss, F., Klauer, C., Pasternak, M., Matrisciano, A. 2017. Systematic reduction of detailed chemical reaction mechanisms for engine applications, *J. Eng. Gas Turbines Power*, 139(9): 091701
- [20] Lamoureux, N., El Mehubi, H., Pillier, L., de Persis, S. and Desgroux, P. 2016. Modeling of NO formation in low pressure premixed flames, *Combustion and Flame*, 163 557-575
- [21] Seidel, Lars; Mestre, Laura; Mante, Till; Theile, Martin; Hoppe, Antje; Prehn, Sascha; Buchholz, Bert; Mauss, Fabian: "Numerical Study of NH₃-Diesel Combustion in a Retrofit for Marine Engines using Detailed Kinetics", *CI-MAC-Congress*, 16.-23.06.2023, Busan
- [22] Seidel L., Mestre L. , Mante T. , Theile M. , Hoppe A. , Prehn S. , Buchholz B., Mauss F. 2023 Numerical study of NH₃-hydrocarbon (Diesel) chemistry interaction in marine engines using detailed reaction kinetics, 2nd Symposium on Ammonia Energy 11/13 July 2023 University of Orlean (France)

REMAP

ENTWICKLUNG LUFTDROHNEN-GESTÜTZTER ECHTZEITDATENDIENSTE AUS OPTISCHEN SENSOREN

AUTOREN

DR. THOMAS HEEGE	EOMAP GMBH & CO KG
DR. KNUT HARTMANN	EOMAP GMBH & CO KG
DR. MARTIN NÄGELE	OPTOPRECISION GMBH
DR. ENNO PETERS	DLR BREMERHAVEN, DLR BERLIN

1. AKTUELLE SEEGRUNDINFORMATIONEN IM KÜSTENVORFELD

Für eine sichere Navigation und effiziente Planung maritimer Operationen im Küstenvorfeld spielen aktuelle, räumliche und genaue Daten zur Wassertiefe und Seegrundbeschaffenheit seit jeher eine zentrale Rolle. Mit dem rasanten Ausbau von kritischen Infrastrukturen z. B. zur Energieversorgung, mit der zunehmenden Bedeutung der maritimen Lieferketten, und angesichts einer angespannten militärischen Sicherheitslage haben aktuelle flächen-deckende Informationen deutlich an Bedeutung gewonnen. Gleichwohl sind solche Datenerhebungen mit traditionellen schiffsgebundenen Methoden zeitintensiv, lückenhaft und mit Risiken verbunden. Flugzeuggestützte Lidar-Systeme sind insbesondere für die Flachwasserzonen zeiteffizienter, aber immer noch kostenintensiv bei deutlichem Planungsaufwand. Flexible drohnengestützte Systeme mit leichter passiver Sensorik können dagegen ohne aufwendige Vorbereitung mitgeführt, kosteneffizient und echtzeitfähig eingesetzt werden. Sie benötigen jedoch eine abgestimmte Systemkonzeption aus geeigneter Sensorik und anspruchsvoller Datenanalytik, die bislang operationell noch nicht verfügbar ist. Ziel des Projektes REMAP Rapid Environmental Monitoring via Airborne optical Platforms ist die Entwicklung eines solchen flexiblen Systems zur Bereitstellung von Wassertiefe und Seegrundinformationen (Hindernisse, Vegetation, Infrastruktur) in optisch flachen Küstengewässern.

Diese relevante maritime Zukunftstechnologie entwickelt ein Konsortium aus High-Tech-Unternehmen und Forschungspartnern im REMAP-Projekt: Die EOMAP GmbH & Co KG entwickelt die Datenanalytik zur Ableitung der maritimen Messgrößen, die OptoPrecision GmbH die moderne Sensorik inklusive anspruchsvollster Datenvorprozessierung für abbildungsscharfe Ausgangsdaten. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt Bremen und Berlin stellt sich mit Untersuchungen im Unterwasser-Strahlungsfeld und Unterstützung bei der Fernerkundungs-Sensorik den grundlegenden wissenschaftlichen Fragestellungen.

Wir erwarten, dass durch das entwickelte Verfahren ein neues Messverfahren zur sehr hoch aufgelösten Wassertiefe entsteht, welches, im Vergleich zu existierenden Lösungen, sowohl günstiger als auch höher aufgelöste Informationen über die Uferzonen vermessen kann. Dies

kann sowohl für Vermessungsunternehmen (z.B. Unterwasserkabel) als auch für wissenschaftliche Fragestellung (z.B. Sedimenttransport) von hoher Relevanz sein.

2. DER SCHARFE BLICK INS WASSER: HERAUSFORDERNDE UMWELTBEDINGUNGEN BEI DER DATENERFASSUNG MIT TECHNISCHEN INNOVATIONEN MEISTERN



Abb. 1: Hexacopter-Aufbau mit Multispektral- und Polarisationskamera von Optoprecision vor dem Einsatz über der Flachwasserzone

Um die Vorteile leichter drohnengestützter Systeme und multispektraler Sensoren wie in Abbildung 1 dargestellt zur Bereitstellung von Seegrundinformationen zu nutzen, sind viele technische Hürden zu meistern: Flexibilität bei der Erhebung optischer Daten bedeutet hohe Komplexität bei der Datenanalyse und Datenprozessierung, um aus Anwendersicht die hochaufgelösten Daten zur Wassertiefe oder des Seegrundes in einem leicht handhabbaren Workflow sehr schnell zu erhalten. Vielfältigste Umweltbedingungen müssen in der Analytik korrekt berücksichtigt und korrigiert werden: Sich ändernde Bedingungen in der Atmosphäre und Beleuchtung, vielfältige Aufnahme-Geometrien, eine ständig bewegte Wasseroberfläche, sich verändernde Transparenz im Wasser, sowie auch unterschiedlichste Seegrundeigenschaften. Beispielsweise verändert die bewegte Wasseroberfläche den Strahlungsgang Unterwasser und damit die räumliche Zuordnung.

Abbildung 2 zeigt ein Praxis-Beispiel dieser zu korrigierenden Umweltbedingungen aus den Daten der Multispektralkamera einer Drohnen-Befliegung von Optoprecision an der Kieler Förde im September 2023: Klar erkennbar sind die unterschiedlichsten Wellenstrukturen und ihr Einfluss auf das Lichtfeld unter Wasser und am Seegrund.

Beispielhafte Bilder dieser Flugkampagne zeigen die Herausforderungen, die bei der Prozessierung realer Bilder noch gemeistert werden müssen. Übersteuerte oder sonstig unbrauchbare Pixel im Bild durch direkte Sonnenreflexion oder auf der Wasseroberfläche schwimmende Objekte müssen erkannt werden. Diese Bildlücken müssen mit geeigneten Interpolationsmethoden aufgefüllt werden. Es müssen Kriterien für die Bewertung der Bildqualität entwickelt werden. Die erreichbare Bildqualität in Abhängigkeit von der Tageszeit und den Wetterbedingungen muss durchdacht und mit den zukünftig wirtschaftlich sinnvollen Einsatzbedingungen abgeglichen werden.

3. FELD- UND LABOREXPERIMENTE LIEFERN DATEN ZUR ÜBERPRÜFUNG VON ARBEITSHYPOTHESEN UND PROZESSIERVERFAHREN

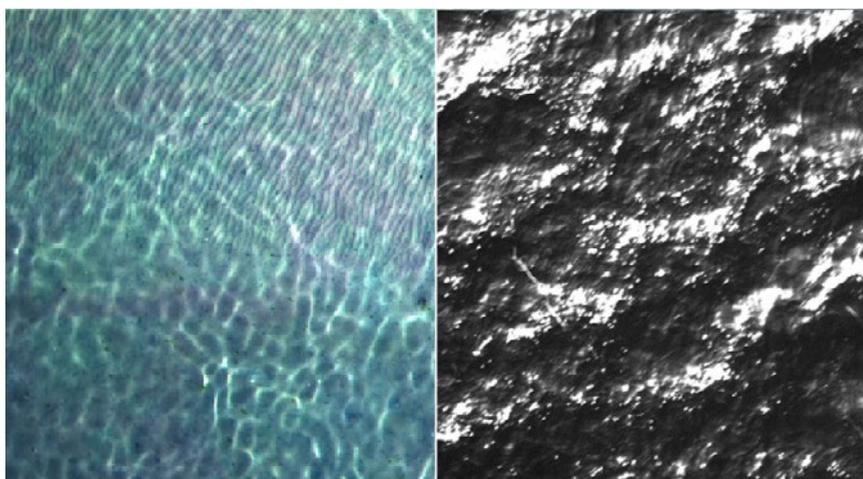


Abb. 2: Einfluss von Oberflächenwellen auf die Lichtverteilung und Lichtbrechung, sichtbar gemacht am Beispiel der multispektralen Drohnenaufnahme von Optoprecision (links) sowie der Polarsens-Bildaufnahme (rechts – schwarzweiss) im September 2023 über der Flachwasserzone nahe dem Leuchtturm Kiel-Friedrichsort.

Können nun mit bislang in der Praxis wenig genutzten physikalischen Messgrößen wie der Polarisation Störeffekte an der bewegten Wasseroberfläche besser erkannt, die räumliche Zuordnung von Datenpunkten unter Wasser verbessert werden, die Oberflächenreflexionen genauer differenziert werden vom Signal aus dem Wasserkörper? Das Konsortium prüft einen umfangreichen Rahmen an technischen Möglichkeiten und Verfahren, um ein geeignetes Sensorik-Setup zu entwickeln.

Zur Erprobung wurde ein Demonstrator auf Basis des Hexacopters in Abbildung 1 erfolgreich aufgebaut und getestet. Das Fluggerät trägt die Multispektralkamera und die Polarisationskamera mit Objektiven so, dass das gleiche Sichtfeld erfasst wird. Das sehr große, lichtstarke Objektiv ist vor der Polarisationskamera montiert, um auch bei der notwendigen spektralen Filterung noch ausreichend Licht für die Belichtung mit relativ kurzen Belichtungs-

zeiten zu erhalten. Zusätzlich wird in der Bildmitte mit einem Laser-Rangefinder die Flughöhe verifiziert. Für die Erfassung der hemisphärischen Einstrahlung ist im Zentralbereich des Fluggerätes eine RGB-Kamera mit Fischaugenobjektiv nach oben gerichtet montiert. Im hinteren Bereich des Fluggerätes ist der Ausleger mit dem montierten blauen Laser zu sehen, der die redundante Berechnung der Wassertiefe ermöglichen soll.

Optoprecision sowie das DLR-Institut für den Schutz maritimer Infrastrukturen erprobte den Informationsgehalt polametrischer Messungen und deren Modellierung durch verschiedene Messaufbauten, wie in Abbildung 3 dargestellt. Optoprecision konnte den Entzerrungsprozess von durch Wellen gestörten Bildern an einem Testaufbau am Pool verifizieren. Definierte erzeugte sinusähnliche Wellen konnten ausgewertet und die lokale Oberflächenneigung visualisiert werden. Dabei konnte die Bildqualität bereits verbessert werden, wenngleich die Arbeiten noch nicht zufriedenstellend abgeschlossen sind bzw. auf die Entzerrung der drohnengestützten Aufnahmen angewendet werden können.

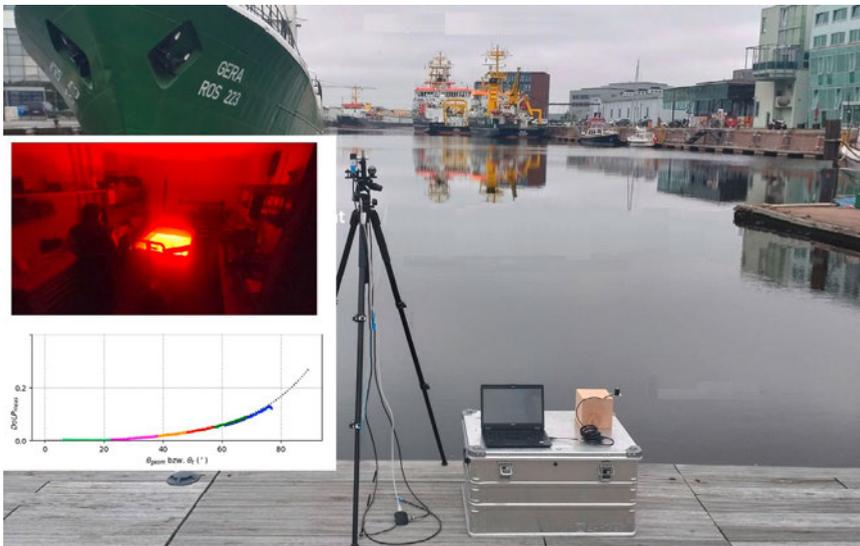


Abb. 3: Aufbau zur polametrischen Messung mit der RGB PolarSensRot unter verschiedenen Winkeln im Hafenbecken in Bremerhaven sowie im Labor bei Messungen im roten Spektralbereich (links) mit modelliertem und gemessenem Grad der Polarisation

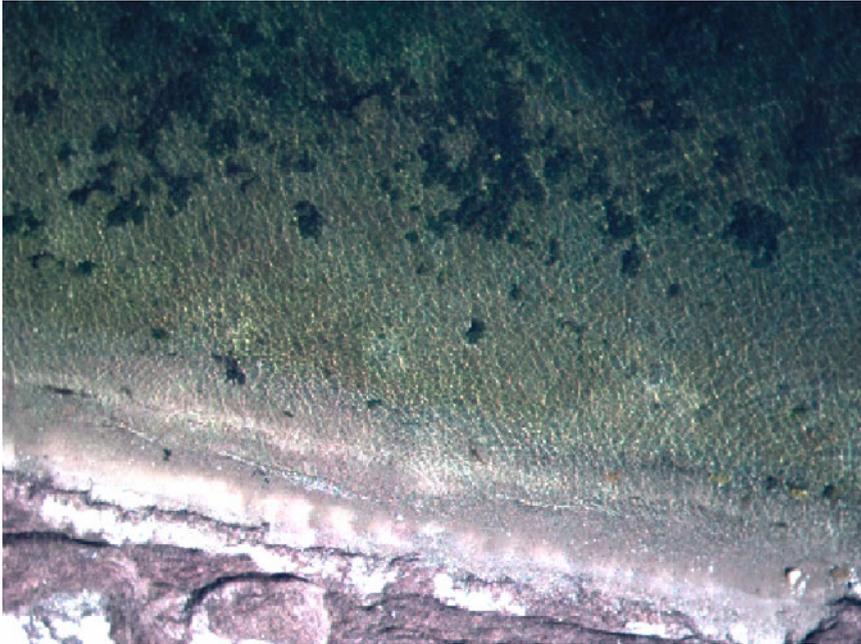


Abb. 4: RGB - Darstellung von Daten der Multispektralkamera über der Flachwasserzone Kiel-Friedrichsort in der Kieler Förde: Dank verbesserter Optik liefert die Kamera einen höhere räumlich-spektrale Abbildungsschärfe, eine wichtige Voraussetzung für eine korrekte Datenanalytik der Prozesskette zur Ableitung der Wassertiefe auf höchster räumlicher Auflösung.

4. VON DATEN ZUR INFORMATION

Die Datenanalytik zur Berechnung der Wassertiefe und Seegrundeigenschaften im optischen Flachwasserbereich, also den ersten 3 bis 20 Metern in Abhängigkeit von der Gewässertrübung, nutzt im Kern den multispektralen Informationsgehalt des aus dem Wasserkörper zurückgestreuten Lichtes im sichtbaren bis nahen Infrarotlichtes. Im Vergleich zu der existierenden satellitengestützten Analytik mussten signifikante Entwicklungen vorgenommen werden, um variable Flughöhen, vielfältige Aufnahmegeometrien der jeweiligen Bildframes, relative und absolute Lagegenauigkeiten, unterschiedlichste Einstrahlungsbedingungen für Flüge unter Wolkenbedingungen uvm. physikalisch korrekt zu berücksichtigen. Da für vergleichsweise günstige drohnengestützte Multispektralsensoren keine hochgenaue radiometrische Kalibrierung wie bei Satellitensensoren möglich erschien, wurde die Eingangsgröße zur Analyse von Radianzen (außerhalb der Atmosphäre) umgestellt auf Reflektanz in Flughöhe – mit entsprechenden algorithmischen Verfahrensänderungen. Entsprechend musste ein zusätzlicher Hemisphären-Sensor für das einfallende Sonnen- und Himmelslicht in das Sensorkpaket auf der Drohne eingefügt werden. Zusätzlich wurde ein Daten-Assimilations-Konzept für die Nutzung von Kalibrationsdaten aus einem Lidar-Profilier für Messungen längs der Flugrichtung implementiert.

Zur Prozessierung der sehr hohen Datenmengen mussten deutliche Aufwendungen in der Geschwindigkeitsoptimierung vorgenommen werden. Ziel war die Auswertegeschwindigkeit

keit der Datenanalytik um mehrere Größenordnungen zu reduzieren. Entwickelt und erfolgreich implementiert wurden Konzepte zu on-the-fly- Machine-Learning zur Skalierung der Operationen, sowie eine gemischte CPU- & GPU-(Grafikkarten-) Umsetzung mit entsprechender Parallelisierung. Gleichwohl müssen die erreichbaren Geschwindigkeiten der laufenden Entwicklungen für eine Echtzeit-Fähigkeit noch weiterentwickelt werden.

In der Praxis wurden die neuen Verfahren anhand verschiedener Konstellationen und Gebiete getestet: Drohnengestützte Befliegungen wurden über Hafenanlagen am Ostseebad Prerow in Mecklenburg-Vorpommern, im Flachwasserbereich östlich der Wismar-Bucht bei Hohenwischendorf gemeinsam mit dem externen Partner Fugro Bremen unter Einsatz einer Maia 8-Kanal Kamera durchgeführt. In Portugal wurde eine RedMX blue Mehrkanalkamera getestet. Im September 2023 wurden in der Kieler Förde gleich mehrere Systeme verglichen: Neben Aufnahmen mit zwei Drohnensystemen von Optoprecision und Fugro hat auch das Landesamt für Umwelt Schleswig-Holstein eine flugzeuggestützte Referenzbefliegung mit einem Riegl-Lidar-Scanner durchgeführt. Unterwasser hat das DLR Referenzmessungen zur Wassertiefe mittels Multibeam-Sonar auf dem autonomen Unterwasserfahrzeug (Seekatze) durchgeführt.

Abbildung 5 visualisiert die erreichbaren Ergebnisse für die Wassertiefe am Beispiel zweier verschiedener Gebiete in der Ostsee. Die extrem hohe räumliche Auflösung von 2cm wie rechts dargestellt für die Hafemole nahe Prerow wären derzeit wohl mit keinem anderen derart leichten und flexiblem luftgestütztem System erreichbar.

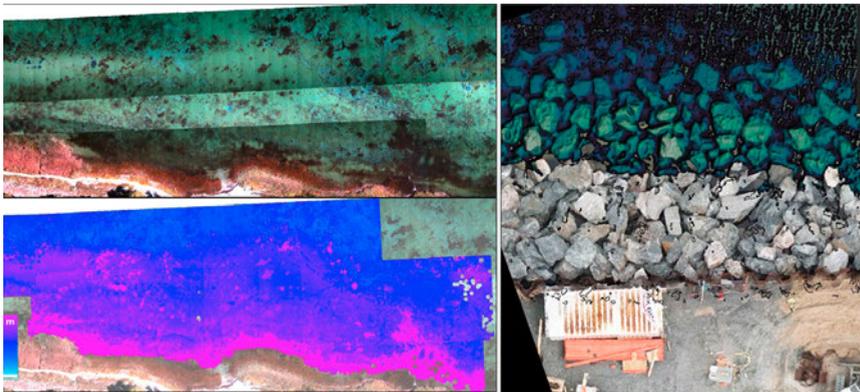


Abb. 5: Drohnengestützte Wassertiefe im Flachwasserbereich, links vor Wismar in 15cm räumlicher Auflösung, oben die Echtfarbendarstellung der Flugstreifen. Rechts dargestellt ist die berechnete Wassertiefe bis 5m Tiefe über einer Steinmole nahe Prerow/Ostsee, in 2cm räumlicher Auflösung pro Datenpunkt, eingebettet in das Echtfarbenbild über Land.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Entwicklungen im REMAP Projekt sind noch nicht abgeschlossen, jedoch zeigen die bislang erreichten Ergebnisse künftig vielversprechende Anwendungsmöglichkeiten. Insbesondere die extrem hohe räumliche Information über Wassertiefen ermöglicht es u.a.

kleinräumige Sedimentverlagerungen, Volumenabschätzungen von Steinen/Findlingen oder Uferbefestigungen im Flachwasserbereich zu ermöglichen. Dies zusammen mit dem simplen Vermessungsaufbau, einer Drohne mit multispektraler Kamera und Positionierungs-Sensorik, stellt einen echten Mehrwert für die Flachwasservermessung dar. Das Konzept wurde bisher in vier Testgebieten (3x Ostsee und 1x Mittelmeer) erfolgreich getestet. In diesen Pilotstudien konnten aber auch die Notwendigkeiten für zukünftige Arbeiten dargestellt werden. Diese liegen insbesondere in der exakten Positionierung der multi-spektralen Aufnahmen über Wasser (bei der Abwesenheit von Bild-Referenzpunkten), der großflächigen Vermessung von Flachwasserzonen (Flächen von mehreren km² Fläche), Analysen zur Präzision und Genauigkeiten und der vollautomatisierten Datenanalyse mitsamt Nutzeroberfläche (ggf. cloudbasiert). Mit diesen zukünftigen Forschungsarbeiten gehen wir davon aus, dass der Weg vom bestehenden Prototyp bis zur erfolgreichen Markteinführung erreicht werden kann. Dabei zeigen die bisherigen Untersuchungen mit komplexeren Multisensorsystemen die Möglichkeiten auf, verschiedene Kundenanforderungen hinsichtlich Sensorauflösung, Reichweite und Gebietsabdeckung mit anforderungsspezifischen, kostengünstigeren Lösungen zu befriedigen.

SCHRIFTENREIHE PROJEKTRÄGER JÜLICH

1. Technologie- und Erkenntnistransfer aus der Wissenschaft in die Industrie
Eine explorative Untersuchung in der deutschen Material- und Werkstoffforschung
hrsg. von A. Pechmann, F. Piller und G. Schumacher (2010), 230 Seiten
ISBN: 978-3-89336-624-8
2. STATUSTAGUNG SCHIFFFAHRT UND MEERESTECHNIK
Tagungsband der Statustagung 2010 (2010), 173 Seiten
ISBN: 978-3-89336-677-4
3. STATUSTAGUNG SCHIFFFAHRT UND MEERESTECHNIK
Tagungsband der Statustagung 2011 (2011), 227 Seiten
ISBN: 978-3-89336-745-0
4. STATUSTAGUNG SCHIFFFAHRT UND MEERESTECHNIK
Tagungsband der Statustagung 2012 (2012), 206 Seiten
ISBN: 978-3-89336-832-7
5. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
Tagungsband der Statustagung 2013 (2013), 188 Seiten
ISBN: 978-3-89336-922-5
6. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
Tagungsband der Statustagung 2014 (2014), 179 Seiten
ISBN: 978-3-95806-006-7
7. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
Tagungsband der Statustagung 2015 (2015), 196 Seiten
ISBN: 978-3-95806-104-0
8. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
Tagungsband der Statustagung 2016 (2016), 220 Seiten
ISBN: 978-3-95806-187-3
9. STATUSSEMINAR MEERESFORSCHUNG mit FS SONNE
14.–15. Februar 2017 in Oldenburg–Tagungsband (2017), 221 Seiten
ISBN: 978-3-95806-207-8
10. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
Tagungsband der Statustagung 2017 (2017), 224 Seiten
ISBN: 978-3-95806-277-1
11. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
Tagungsband der Statustagung 2018 (2018), 224 Seiten
ISBN: 978-3-95806-366-2

12. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
Tagungsband der Statustagung 2019 (2019), 187 Seiten
ISBN 978-3-95806-439-3

13. STATUS CONFERENCE RESEARCH VESSELS 2020
Conference transcript | Online-Publikation (2020), 409 Seiten
ISBN: 978-3-95806-479-9

14. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
Tagungsband der Statustagung 2021 (2021), 289 Seiten
ISBN 978-3-95806-594-9

15. STATUS CONFERENCE RESEARCH VESSELS 2022
Conference transcript
Online-Publikation (2022), 476 Seiten
ISBN: 978-3-95806-608-3

16. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
Tagungsband der Statustagung 2022 (2022), 285 Seiten
ISBN 978-3-95806-673-1

17. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
Tagungsband der Statustagung 2023 (2023), 275 Seiten
ISBN 978-3-95806-732-5